



HAL
open science

Contribution à la formalisation et à l'évaluation de propriétés non-fonctionnelles pour l'ingénierie de système complexe : application à la résilience.

Behrang Moradi Koutchi

► To cite this version:

Behrang Moradi Koutchi. Contribution à la formalisation et à l'évaluation de propriétés non-fonctionnelles pour l'ingénierie de système complexe : application à la résilience.. Autre [cs.OH]. IMT - MINES ALES - IMT - Mines Alès Ecole Mines - Télécom, 2019. Français. NNT : 2019EMAL0009 . tel-02899913

HAL Id: tel-02899913

<https://theses.hal.science/tel-02899913>

Submitted on 15 Jul 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

**THÈSE POUR OBTENIR LE GRADE DE DOCTEUR
ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE DES MINES D'ALÈS (IMT MINES ALÈS)**

En [intitulé du diplôme]

École doctorale Information, Structure et Systèmes
Portée par l'Université de Montpellier

Unité de recherche LGI2P de l'IMT Mines Alès

Titre de la thèse

**Contribution à la formalisation et l'évaluation des
exigences non-fonctionnelles : application à la résilience**

Présentée par Behrang MORADI KOUTCHI
Le 13 Novembre 2019

Sous la direction de Nicolas DACLIN, Directeur de thèse
et Vincent CHAPURLAT coDirecteur de thèse

Devant le jury composé de

Mr. Didier CRESTANI, Professeur, Université de Montpellier

Mr. Christian DESPRES, Directeur de Recherche, Ministre de la transition écologique et de la
recherche

Mme. Aline CAUVIN, MCF HDR, Université de Marseille

Mr. David CHEN, Professeur, Université de Bordeaux

Nicolas DACLIN, Maitre-Assistant HDR, IMT Mines Alès

Vincent CHAPURLAT, Professeur, IMT Mines Alès

Président du jury

Examineur

Rapporteur

Rapporteur

Directeur de thèse

Co-Directeur de thèse



INTRODUCTION	13
CHAPITRE 1 CONTEXTE ET PROBLEMATIQUE	17
1. Introduction	19
2. Contexte	19
2.1. Ingénierie système	19
2.2. Notion d'exigences dans les organisations	21
2.3. Maitrise des exigences au sein des systèmes	22
2.4. Les « -ilités	23
2.5. La résilience	25
3. Problématique de l'évaluation de la résilience	26
3.1. Nécessité de gérer la résilience dans le contexte des « -ilités	26
3.2. Nécessité de caractériser la résilience	27
3.3. Nécessité d'évaluer la résilience	28
4. Conclusion	28
CHAPITRE 2 CONCEPT, DEFINITION ET EVALUATION DE LA RESILIENCE : ETAT DE L'ART	29
1. Introduction	31
2. La résilience	31
2.1. Définitions	31
2.2. Dynamique de la résilience.....	35
a. Zone de pro-activité : l'anticipation	36
b. Zone de réactivité : la réponse et le rétablissement	37
3. Synthèse sur le concept de résilience	39
4. Evaluation de la résilience	41
4.1. Résilience comme exigence non fonctionnelle : l'écosystème d'« -ilités » ...	41
4.2. Méthode d'évaluation de la résilience	43
4.2.1. Panorama des méthodes d'évaluation de la résilience	44
4.3. Synthèse de la mesure de résilience	50
5. Conclusion	52

CHAPITRE 3 : CARTOGRAPHIE DE LA RESILIENCE POUR L'EVALUATION.....	53
1. Introduction	55
2. Vers la définition des cartographies de la résilience : concepts	55
3. Cartographie des relations de résilience	57
3.1. Existence de la relation	58
3.2. Nature de la relation	62
3.3. Orientation de la relation	63
3.4. Cartographie	64
4. Cartographie de la dynamique de la résilience	64
4.1. Zone d'anticipation : capacités attendues et exemples de positionnements	66
4.2. Zone de réponse : capacités attendues et exemples de positionnements	68
4.3. Zone de rétablissement : capacités attendues et exemples de positionnement	70
4.4. Cartographie	72
5. Conclusion	76
CHAPITRE 4 : EVALUATION DE LA RESILIENCE	77
1. Introduction	79
2. Motivation et démarche de développement	79
3. Evaluation de la résilience	81
3.1. Généralités sur le modèle d'évaluation	81
3.2 Paramètres	82
3.2.1. L'état courant (γ)	82
3.2.2. L'impact (ω)	84
3.2.3. La priorité (\triangleright)	84
3.2.4. L'existence (σ)	86
3.2.5. L'opérabilité (ϕ)	87
3.3. Hypothèses	88
3.4. Modèle d'évaluation	89
3.4.1 Evaluation de l'opérabilité d'une source sur la résilience.....	89
3.4.2 Evaluation de l'opérabilité de plusieurs sources sur la cible.....	90
3.4.2.1 - évaluation au sein d'un groupe (ex. $i_{G1} \triangleright \bar{i}_{G2}$)	91
3.4.2.2 - évaluation entre deux groupes (ex. $i_{G1} \triangleright^H i_{G2}$ ou $i_{G1} \triangleright^L i_{G2}$) .	92

3.4.2.3 Evaluation de l'opérabilité entre les trois groupes de priorité	94
4. Modèles d'interprétation de l'évaluation.....	95
4.1. Interprétation de l'opérabilité dans la zone d'anticipation.....	96
4.2. Interprétation de l'opérabilité dans la zone de réponse	98
4.3 Interprétation de l'opérabilité dans la zone de rétablissement.....	100
5. Calcul de l'opérabilité globale finale.....	102
6. Conclusion.....	103

CHAPITRE 5 : APPLICATION D'APPROCHE DE L'EVALUATION DE LA RESILIENCE..... 105

1. Introduction.....	107
2. Présentation du cas d'étude.....	107
2.1. Présentation générale	107
3. Application du modèle d'évaluation de la résilience	110
3.1. Nécessité d'évaluer et maîtriser la résilience pour le système de lutte incendie	110
3.2. Cartographie de la résilience.....	110
3.3. Exigences majeurs pour la résilience du système de lutte incendie	111
4. Evaluation de la résilience du système de lutte incendie (opérabilité)	113
4.1. Existence (σ).....	113
4.2. Etat courant (γ).....	114
4.3. Impact (ω).....	116
4.4. Priorité (\triangleright)	117
4.5. Evaluation de l'opérabilité de chaque « -ilities » sur la résilience	118
4.6. Evaluation de l'opérabilité de plusieurs sources sur la résilience	118
4.6.1. Évaluation au sein d'un groupe (ex. $is1 \triangleright is2$)	118
4.6.2 Evaluation de l'opérabilité entre différents groupes.....	120
A - Evaluation de l'opérabilité pour la zone d'anticipation.....	120
B - Evaluation de l'opérabilité pour la zone de réponse	121
C - Evaluation de l'opérabilité pour la zone de rétablissement....	121
5. Interprétation	122
5.1. Anticipation.....	122
5.2. Réponse	123
5.3. Rétablissent	124

6. Conclusion.....	125
CONCLUSION, LIMITATES ET PERSPECTIVES.....	127
1. Conclusion.....	128
2. Limites et perspectives.....	129
BIBLIOGRAPHIE	131
ANNEXE A : Liste des publications.....	142

Liste des Figure

Figure 1 Système de systèmes de transport aérien	20
Figure 2 Exemple de typologie d'exigence.....	21
Figure 3 Exigences Non-Fonctionnelles et d'exemples « -ilities » impactant la qualité de service	24
Figure 4 Liste d' « ilities » identifiées par Willis incluant la résilience	24
Figure 5 Le triangle de la résilience de Bruneau	35
Figure 6 Dynamique de la résilience.....	36
Figure 7 Dynamique de la résilience selon l'état du système	39
Figure 8 Réseau de corrélation des « -ilities »	42
Figure 9 Classification des approches d'évaluation de la résilience.....	44
Figure 10 La relation entre le temps et la fonctionnalité du système.....	45
Figure 11 Mesure de la résilience via la performance du système.....	45
Figure 12 Mesure de la résilience via la transition de la fonction.....	46
Figure 13 Mesure de la résilience via les pertes de fonctionnalités	47
Figure 14 Direct Static Economic Resilience	47
Figure 15 Mesure de la résilience via la qualité de service.....	48
Figure 16 Dimensions de la résilience : Rapidité (a) et robustesse (b) et équation (c)	48
Figure 17 Mesure de résilience via l'efficacité des barrières de sécurité.....	50
Figure 18 Mesure de la résilience pour les systèmes de distribution d'énergie.....	50
Figure 19 Mesure de la résilience pour les infrastructures en réseau.....	50
Figure 20 Réseau de corrélation des « ilities »	56
Figure 21 Différents référentiels de « -ilities »	57
Figure 22 Existence d'« -ility » dans la relation avec la résilience (a) existence indirecte, (b) existence directe	59
Figure 23 Cartographie des relations	64
Figure 24 Dynamique de la résilience via trois zones (Anticipation, Réponse, Rétablissement)	65
Figure 25 Zone d'anticipation : (a) sans les capacités fournies « -ilities », (b) avec les capacités fournies « -ilities »	66
Figure 26 Zone de réponse : (a) sans les capacités fournies par les « -ilities », (b) avec les capacités fournies par les « -ilities »	69
Figure 27 Zone de rétablissement : (a) sans les capacités fournies par les « -ilities », (b) avec les capacités fournies par les « -ilities ».....	71
Figure 28 Cartographie de la dynamique de la résilience	75
Figure 29 Principe général du modèle d'évaluation	81
Figure 30 Principe général de l'évaluation par zone de résilience.....	82
Figure 31 Valeur courante γ de l'« ility » maintenabilité	83
Figure 32 Exemple de graphe de relation pour la zone d'anticipation avec l'existence de la sécurité et de la robustesse	87
Figure 33 Opérabilité et ses paramètres positionnés entre deux « -ilities » sources et une « -ility » cible.....	87
Figure 34 Paramètres pour l'évaluation de la résilience sous l'influence d'une source	89

Figure 35 Paramètres utilisés pour l'évaluation de la résilience sous l'influence de plusieurs « -ilités »	91
Figure 36 Courbe de résilience pour l'interprétation	96
Figure 37 Positionnement des valeurs d'opérabilité pour la zone d'anticipation	97
Figure 38 Positionnement des valeurs d'opérabilité pour la zone de réponse	99
Figure 39 Positionnement des valeurs d'opérabilité pour la zone de rétablissement.....	101
Figure 40 Modèle de système de système	109
Figure 41 Modèle simplifié du système incendie pour l'évaluation de la résilience	109
Figure 42 Cartographie des relations	111
Figure 43 Cartographie de relation de résilience pour le système incendie.....	111
Figure 44 Cartographie de relation de la dynamique de résilience selon le système incendie	113
Figure 45 Interprétation de l'opérabilité pour la zone d'anticipation	123
Figure 46 Interprétation de l'opérabilité pour la zone de réponse	124
Figure 47 Interprétation de l'opérabilité pour la zone de rétablissement.....	124

Liste des Tableaux

Tableau 1 Définition de résilience selon différents domaines d'applications	32
Tableau 2 Définition de la résilience selon sa dynamique et différentes visions	40
Tableau 3 Synthèse des capacités attendues pour la dynamique de résilience	41
Tableau 4 Synthèse des méthodes de mesure de résilience	51
Tableau 5 Caractéristique commun de la résilience et les « -ility ».....	60
Tableau 6 « -ilities » positionné à la zone d'anticipation de la résilience.....	68
Tableau 7 « -ilities » positionné à la zone de réponse de résilience.....	70
Tableau 8 « -ilities » positionné à la zone de rétablissement de résilience	72
Tableau 9 Positionnements de « -ilities » sur la dynamique de la résilience	73
Tableau 10 Illustration de table des priorités selon la dynamique de la résilience	86
Tableau 11 Tableau d'opérabilité d'une cible résultant de l'influence de la source.....	90
Tableau 12 Table d'évaluation au sein d'un même groupe de « -ilities »	92
Tableau 13 Table d'évaluation entre deux groupe pour $\Phi_1 < \Phi_2$	93
Tableau 14 Tableau final d'évaluation entre 2 groupes avec $i_1 \triangleright^H i_2$	93
Tableau 15 Tableau final d'évaluation entre 2 groupes avec $i_1 \triangleright^L i_2$	94
Tableau 16 Evaluation de la résilience entre les trois groupes de priorité.....	95
Tableau 17 Interprétation des valeurs d'opérabilité pour la zone d'anticipation.....	98
Tableau 18 Interprétation des valeurs d'opérabilité pour la zone de réponse	100
Tableau 19 Interprétation des valeurs d'opérabilité pour la zone de rétablissement	102
Tableau 20 Tableau final d'évaluation entre l'état courant de résilience et l'opérabilité obtenu	103
Tableau 21 Existence de « -ilities » via 3 sous-système selon cycle de vie de résilience.....	114
Tableau 22 Evaluation de l'état courant des « -ilities »	115
Tableau 23 Table d'existence et d'impact de « -ilities » de système de système la résilience	117
Tableau 24 Illustration de table des priorités de trois systèmes.....	117
Tableau 25 Tableau d'opérabilité de résilience résultant de l'influence de chaque « -ility »	118
Tableau 26 Evaluation de l'opérabilité au sein d'un même groupe pour la zone d'anticipation	119
Tableau 27 Evaluation de l'opérabilité au sein d'un même groupe pour la zone de réponse	119
Tableau 28 Evaluation de l'opérabilité au sein d'un même groupe pour la zone de rétablissement.....	119
Tableau 29 Evaluation de l'opérabilité au sein d'un même groupe pour toutes les zones ...	120
Tableau 30 Evaluation de l'opérabilité pour la zone d'anticipation	120
Tableau 31 Evaluation de l'opérabilité pour la zone de réponse	121
Tableau 32 Evaluation de l'opérabilité pour la zone de rétablissement.....	121
Tableau 33 Evaluation de la résilience sur les zones	122

« On ne voit bien qu'avec cœur, l'essentiel est invisible pour les yeux »

Saint Exupéry

Remerciement

J'adresse mes remerciements, en premier lieu, à toutes les personnes, qui m'ont montré leur confiance et apporté leur aide et qui m'ont permis d'arriver au bout de cette thèse. Un grand merci au Laboratoire de Génie Informatique et d'Ingénierie de Production (LGI2P) de l'IMT Mines Alès, en la personne de son directeur, Mr. Jacky MONTMAIN, pour m'avoir accueilli et suivi mes travaux de recherche pendant ces trois ans.

Pour son soutien, sa bienveillance, ses conseils, je tiens à remercier vivement Mr. Nicolas DACLIN, mon directeur de thèse et encadrant, Maître Assistant à l'IMT Mines Alès, qui m'a guidé durant ce parcours et a contribué à l'achèvement de ces travaux qui constituent pour moi un enrichissement personnel qui va au-delà du simple cadre de la recherche scientifique.

Je remercie mon co-directeur de thèse Mr. Vincent CHAPURLAT, professeur à l'IMT Mines Alès ; Avoir été formé sous sa direction a été une expérience inoubliable à tous les niveaux, tant au niveau personnel que professionnel.

Je tiens à exprimer mes profonds respects à l'ensemble des membres du jury de ma thèse, ayant accepté d'évaluer, d'examiner et de rapporter mes travaux. Ce jury fut constitué de Mr. Didier CRESTANI Professeur à l'Université de Montpellier, Mr. Christian DESPRES, Directeur de Recherche, Ministère de la transition écologique et de la recherche, Mme. Aline CAUVIN MCF HDR, Université de Marseille, Mr. David CHEN, Professeur à l'Université de Bordeaux. Leurs remarques pertinentes ainsi que la haute qualité de leur examen m'ont été d'un grand apport.

Un merci particulier à l'ensemble du personnel du LGI2P ainsi qu'à tous les doctorants et en particulier mon collègue de bureau Alexandre : par leur présence, leur disponibilité, leur écoute, et leur gentillesse ils m'ont apporté l'énergie nécessaire à la poursuite de ces travaux. Ils ont fait que ces trois années passées à Nîmes et à Alès me soient agréables.

Enfin les mots les plus simples étant les plus forts, j'adresse toute mon affection à ma famille mon père, ma mère, qui par leur éducation m'ont transmis les valeurs fondamentales qui me guident tous les jours. Malgré mon éloignement depuis de trop nombreuses années, leur compréhension, leur confiance, leur tendresse, leur amour me portent et me structurent au quotidien. Je remercie affectueusement mon amie et professeur de français qui, durant ces années d'études m'a apporté son soutien et son aide en toutes circonstances.

Alès, le 13 Novembre, 2019, à Alès

Behrang

Introduction

Pour fournir leurs services ou mettre à disposition les biens produits répondant à la demande des clients ou des usagers, les organisations (entreprises manufacturières, de santé, de gestion de crise...) doivent satisfaire un ensemble d'exigences comme par exemple celles de performances (délais de mise à disposition du service ou encore qualité). Au-delà des exigences qui concernent son cœur de métier en d'autres termes ce que l'organisation doit faire ; d'autres exigences concernent un ensemble de capacités qui vont supporter la réalisation de sa mission et, ainsi, lui permettre de satisfaire ses objectifs. Suivant les spécificités de l'organisation, ces exigences devront être satisfaites pour remplir à bien la mission définie. C'est le cas notamment dans les systèmes collaboratifs où la notion d'interactions entre les différentes organisations est primordiale et dans lesquelles on développe l'exigence d'interopérabilité. Dans d'autres systèmes tels que les entreprises manufacturières, on peut privilégier la fiabilité des équipements pour respecter une performance de temps liée à la fourniture d'un produit. L'ensemble de ces exigences est parfaitement identifié et appartient au référentiel nommé « -ilities » et dans lequel on retrouve les exigences comme la robustesse, la sécurité, la disponibilité....

Dans ce contexte, les organisations faisant face à des événements perturbateurs – comme par exemple un accident pour une organisation de gestion de crise - peuvent développer les exigences qui vont améliorer sa capacité de traitement de l'aléa. On évoque ainsi depuis plusieurs années le concept de résilience comme un enjeu majeur pour ce type d'organisation. En effet, la résilience apparaît comme une exigence importante et devant être maîtrisée et maximisée par un système qui souhaite faire face à des perturbations et maintenir des niveaux de services et de performances acceptables. Dans ce cadre, la caractérisation et la connaissance du niveau de résilience est fondamentale pour permettre à des organisations d'analyser et de rechercher les solutions adaptées à leur mission.

Les travaux de recherche réalisés dans ce manuscrit tentent de répondre à la problématique de caractérisation, de formalisation et d'évaluation de la résilience. Cette recherche étant réalisée dans le cadre du développement des exigences non fonctionnelles (« -ilities ») des systèmes, la première contribution est donc d'identifier et de caractériser les relations possibles qui peuvent exister entre ces différentes exigences, précisément entre la résilience et d'autres exigences qui pourraient l'influencer. Ensuite, l'objectif étant d'évaluer la résilience, la seconde contribution concerne le développement d'une méthode – ensemble de paramètres et mécanismes d'évaluation - pour obtenir une évaluation du niveau de résilience d'un système.

Le premier chapitre positionne le contexte et la problématique de la résilience et de son évaluation. Nous présentons ainsi la notion de résilience et mettons en évidence son importance pour les organisations. Nous présentons également le contexte dans lequel nous développons notre modèle d'évaluation à savoir celui de l'évaluation des exigences non fonctionnelles de type « -ilities ». Enfin, nous exposons la problématique de nos travaux de recherche selon ces trois dimensions que sont la gestion, la caractérisation et l'évaluation de la résilience.

Le second chapitre présente un état de l'art sur les travaux portant sur la résilience. Nous nous intéressons dans un premier temps à la définition de la résilience pour identifier ses

différentes dimensions ainsi qu'à sa dynamique au travers de son cycle de vie. Nous présentons également la résilience dans le contexte des exigences non fonctionnelles de types « -ilites » pour mettre en évidence les relations existantes entre celles-ci. La deuxième partie de ce chapitre présente et analyse un ensemble de méthodes d'évaluation de la résilience pour nous permettre d'identifier la nécessité d'envisager une méthode d'évaluation basée sur l'étude de l'ensemble des exigences de type « -ilites ».

Le troisième chapitre présente la caractérisation de la résilience au regard de l'ensemble des « -ilites ». A partir d'un écosystème d'« -ilites » existant dans la littérature nous caractérisons les relations qui existent entre la résilience et les autres exigences de cet écosystème. Plus précisément, nous nous intéressons à l'existence des relations qui ne sont pas encore identifiées dans la littérature et également à la nature de ces relations. Nous proposons et présentons ces relations au travers d'une « cartographie » des relations. Dans un second temps, nous nous intéressons au cycle de vie de la résilience et proposons une « cartographie de la dynamique » de la résilience. L'ensemble de ces cartographies nous sert de base pour le développement de notre méthode d'évaluation de la résilience.

Le quatrième chapitre est consacré à la présentation de notre méthode d'évaluation de la résilience. Nous définissons l'ensemble des paramètres nécessaires à l'évaluation ainsi que les différents mécanismes permettant de fournir un niveau de résilience pour une organisation. Par la suite nous proposons une interprétation de ce niveau pour permettre aux organisations d'une part, de comprendre cette évaluation et de statuer sur les actions nécessaires pour améliorer la résilience d'autre part.

Le cinquième chapitre présente enfin un cas d'application de notre méthode. Nous présentons l'exemple d'une organisation dans laquelle le développement de la résilience est un enjeu majeur pour le bon déroulement de sa mission.

Chapitre 1

Contexte et problématique de la résilience

Résumé

Pour remplir la mission qui lui est assignée et atteindre les objectifs fixés, une organisation doit satisfaire un ensemble d'exigences fonctionnelles et non fonctionnelles. Parmi les exigences non fonctionnelles certaines sont identifiées comme mettant à la disposition du système un ensemble de capacités lui permettant d'atteindre les objectifs de sa mission. C'est le cas de la résilience qui apparaît comme une exigence importante et devant être *maitrisée* et *maximisée* pour faire face efficacement à des perturbations. Ce premier chapitre a pour objectif de mettre en évidence les enjeux du développement de la résilience afin d'en extraire la problématique de nos travaux.

Table des matières

1. Introduction	19
2. Contexte.....	19
2.1. Ingénierie système	19
2.2. Notion d'exigences dans les organisations	21
2.3. Maitrise des exigences au sein des systèmes	22
2.4. Les « -ilités ».....	23
2.5. La résilience	25
3. Problématique de l'évaluation de la résilience	26
3.1. Nécessité de gérer la résilience dans le contexte des « -ilités »	26
3.2. Nécessité de caractériser la résilience	27
3.3. Nécessité d'évaluer la résilience	28
4. Conclusion	28

1. Introduction

Les travaux développés dans ce manuscrit se positionnent sur l'amélioration de la capacité de résilience des organisations. Plus précisément, nos travaux ont pour ambition de définir et de développer une méthode d'évaluation de la résilience. L'objectif est d'obtenir une information sur le niveau de résilience d'un système qui soit à la fois précise, pertinente et exploitable par un ensemble de parties prenantes¹. Ce niveau doit en effet permettre à ces parties prenantes de prendre un ensemble de décisions concernant l'amélioration de la capacité de résilience de leur système en tenant compte de ses différentes dimensions et que nous mettrons en évidence et développerons dans les différents chapitres de cette thèse.

Ce premier chapitre vise à comprendre les enjeux du développement de la résilience au sein des organisations. A cet effet, nous présentons dans un premier temps les besoins et les enjeux de la maîtrise des exigences. Nous concentrons ensuite notre propos sur une catégorie d'exigences nommée « *-ilities* » dans la littérature pour mettre en évidence la nécessité de les développer pour des organisations. Nous proposons une première définition de la résilience afin d'obtenir une première vision de la capacité qu'elle peut fournir à un système et ainsi la nécessité de la développer, de l'évaluer et de la maîtriser. Ces premières analyses nous permettent de mettre en évidence notre problématique de l'évaluation de la résilience que nous présentons sous trois aspects à savoir (1) la gestion de la résilience, (2) la caractérisation de la résilience comme exigences et (3), l'évaluation de la résilience.

2. Contexte

2.1. Ingénierie système

« *Un système est un ensemble d'éléments interdépendants qui interagissent entre eux de façon organisée et forment un ensemble unique* » (INCOSE, 2012a). Un système peut être caractérisé comme complexe de par sa taille lorsqu'il intègre un nombre important de composants ou de sous-systèmes, la nature hétérogène de ses éléments, le nombre d'interactions qui peut être important entre ses éléments ou encore l'émergence de comportements. Du fait de cette complexité, il est important de disposer des moyens adéquats (méthodes, outils, moyens de modélisation) lorsque l'on souhaite développer et analyser un système complexe. En outre, d'autres concepts ont émergé ces dernières années et spécialisé la notion de système complexe. C'est le cas notamment du concept de système de systèmes qui se définit comme « *un assemblage de systèmes pouvant potentiellement être acquis et/ou utilisés indépendamment, pour lequel le concepteur, l'acquéreur et/ou l'utilisateur cherche à maximiser la performance de la chaîne de valeur globale, à un instant donné et pour un ensemble d'assemblages envisageables* » (Luzeaux, 2008). Selon (Maier, 1996), un système de systèmes possède des caractéristiques fondamentales comme l'indépendance opérationnelle des composants, l'indépendance de gestion des composants, l'évolution, la répartition géographique et les comportements émergents. On s'aperçoit à travers ces caractéristiques que l'on spécialise la notion de système à travers les aspects d'indépendance

¹ « *Partie ayant un droit, une part ou une prérogative qui fait que le système ou certaines de ses propriétés doivent satisfaire les attentes de cette partie* » (ISO, 2015).

notamment. Dans ce cas, pour ce type de « système », il est nécessaire de disposer également des moyens qui permettent de considérer correctement ces caractéristiques pendant son développement et son analyse. A titre d'exemple, la figure suivante illustre la notion de système de systèmes et la nécessité de mettre à disposition des concepteurs, acquéreurs ou encore utilisateurs les moyens pour développer, analyser et maîtriser les systèmes. Ainsi, nous pouvons constater que nous sommes en présence de systèmes complexes techniques (système avion) et sociotechniques (contrôle aérien) qui fonctionnent et sont gérés indépendamment (la primo mission d'un aéronef est de voler) mais qui doivent aussi interagir ensemble de manière cohérente pour former le système de transport aérien (sans interactions, le système aéronef ne connaît pas le niveau de vol autorisé ou les pistes et circuits qu'il doit emprunter à l'aéroport). De la même manière, ce primo système peut interagir et, dans ce cas, doit le faire également de manière cohérente avec d'autres systèmes tels que le système de transport maritime ou terrien. Il est alors aisément compréhensible que sans méthodes pour développer initialement ces systèmes (ex. prise en compte de la faculté d'interagir pour un système), analyser (ex. analyse de la capacité d'interaction des systèmes pendant la mission) et maîtriser ces systèmes (ex. décision de correction sur la capacité à interagir) ils peuvent rencontrer des dysfonctionnements critiques au cours de leur phase opérationnelle.

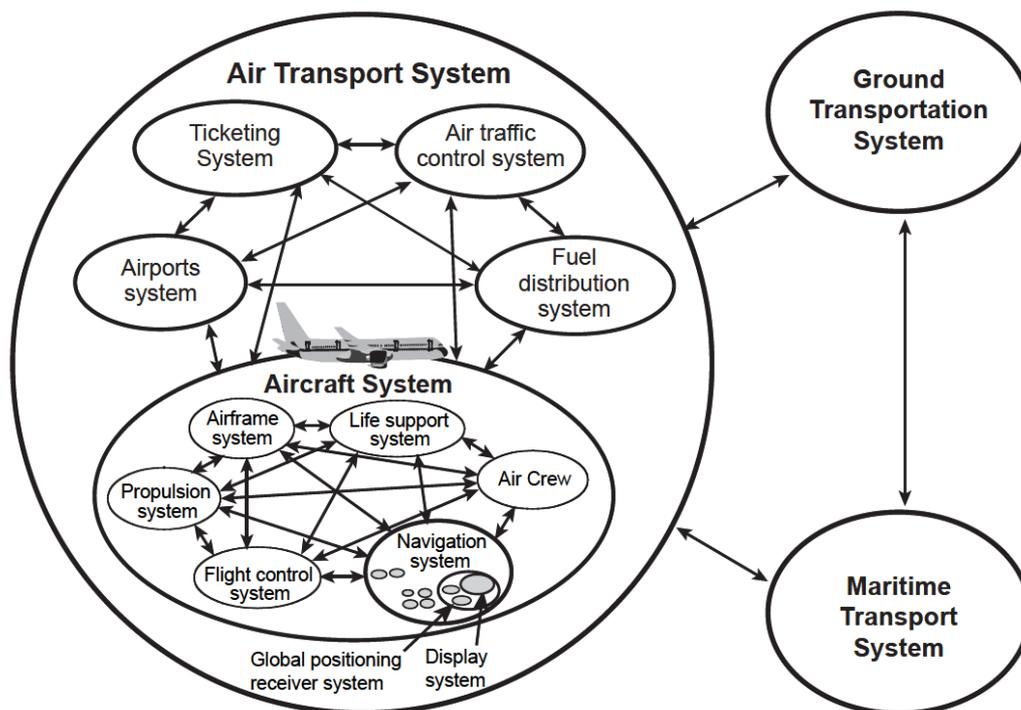


Figure 1. Système de systèmes de transport aérien (Haskins, 2007)

Dans ce contexte, l'ingénierie des systèmes (IS) apparaît comme une « *approche interdisciplinaire et un moyen de permettre la réalisation de systèmes performants. Elle s'attache à définir les besoins des clients et les fonctionnalités requises au début du cycle de développement, à documenter les exigences, puis à procéder à la synthèse de la conception et à la validation du système tout en tenant compte de l'ensemble du problème. L'ingénierie des systèmes prend en compte les besoins commerciaux et techniques de tous les clients dans le* »

but de fournir un produit de qualité qui réponde aux besoins des utilisateurs. » (INCOSE, 2012a). Pour ce faire, l'IS définit et offre un ensemble de processus supporté par des moyens de modélisation, d'évaluation et de pilotage pour arriver à concevoir et mettre à disposition un système satisfaisant des besoins et lui permettant de remplir la mission pour laquelle il est développé.

Nos travaux s'inscrivent dans le cadre de l'ingénierie des systèmes et plus particulièrement sur l'analyse de la capacité d'un système à satisfaire un ensemble d'exigences au cours de sa phase opérationnelle.

2.2. Notion d'exigences dans les organisations

Une organisation qu'elle soit à but lucratif comme une entreprise ou non lucratif comme une association réalise sa mission dans le but de fournir à un ensemble de parties prenantes un bien ou un service. Une exigence est définie comme « *un énoncé qui prescrit une fonction, une aptitude ou une caractéristique à laquelle doit satisfaire un produit ou un système dans un contexte donné* » (Scucanec, 2008). Ainsi, la satisfaction d'une mission se traduit par la satisfaction de l'ensemble des exigences exprimées. On retrouve deux grandes familles d'exigences, les fonctionnelles et les non fonctionnelles. Les exigences fonctionnelles traduisent « ce que doit faire le système » (ex. le système saisit les échantillons, l'organisation secourt les personnes) en « *exécutant des actions pour atteindre un résultat attendu* » (Martin, 1998), i.e., en transformant des flux d'intrants en flux d'extrants. Les exigences non fonctionnelles spécifient une propriété du système et traduisent une contrainte (ex. physique, réglementaire...) qui s'applique au système (ex. le système est maintenable pendant 30 ans) (AFIS, 2009). Hormis cette typologie « fonctionnelles et non fonctionnelles », on retrouve des typologies plus précises (notamment sur les exigences non fonctionnelles) afin d'explicitier la portée de l'exigence (figure 2).

Domaine	Explicitation	Exemples
Fonctionnel	Ce que le système doit faire	Mission, fonctions du système, modes et états du système...
Configuration	Sa composition	Composants majeurs, modularité, accessibilité, éléments fournis...
Interfaces	Ses interfaces externes et internes	Externe : lanceur, GPS, équipage, interne : segment sol-segment spatial...
Physique	Ses caractéristiques physiques	Taille, masse, volume, capacités...
Environnemental	Les conditions sous lesquelles les fonctions sont réalisées	Accélération, altitude, contamination, hygrométrie, radiations, vibrations...
Facteurs de qualité	Les niveaux auxquels les fonctions doivent être réalisées.	Sûreté, efficacité, fiabilité, maintenabilité, disponibilité, ergonomie, flexibilité
Exploitation	Les niveaux d'opérabilité	Autonomie, contrôle, management des dysfonctionnements
Soutien	Le soutien nécessaire à la réalisation des fonctions	Maintenance, approvisionnement, formation, logistique...
Vérification	Méthodes de vérification des exigences	Inspections, revues, essais...

Figure 2. Exemple de typologie d'exigences (AFIS, 2009)

L'activité liée aux exigences est l'ingénierie des exigences qui consiste « à *recueillir, spécifier, affiner et qualifier des exigences relatives à un système à positionner dans son environnement et de maîtriser les évolutions de ces exigences dans le temps* » (AFIS, 2009). Cette activité peut être résumée en trois étapes majeures :

- L'élicitation (ou capture) des exigences qui consiste à découvrir et à recueillir les exigences sur la base de différentes techniques telles que les interviews ou encore la revue de littérature.
- L'expression des exigences qui consiste à exprimer les exigences précisément à l'aide de langages non formels (ex. langage naturel) ou formels (ex. équation mathématique).
- La gestion des exigences qui consiste en la structuration d'un référentiel d'exigences en vue de la gestion des versions, de l'historique ou encore de la traçabilité des exigences.

Ainsi, c'est sur la base de cette ingénierie des exigences qu'un système peut par la suite procéder à l'évaluation de ces exigences pour savoir si elles sont satisfaites ou non (Daclin, 2017).

Dans le cadre de nos travaux, nous porterons notre attention sur les exigences non fonctionnelles qui doivent être satisfaites par une organisation dans la cadre de la réalisation de sa mission (ex. fourniture de service).

2.3. Maîtrise des exigences au sein des organisations

Il est important pour une organisation de maîtriser les exigences qu'elle doit satisfaire afin d'éviter des dérives dans la réalisation de sa mission (voire de l'arrêter) en terme de coûts, de délais ou encore de qualité de service. Ainsi, maîtriser les exigences doit permettre :

- De justifier le choix d'une solution envisagée par l'organisation pour satisfaire à sa mission dans les limites identifiées. En fonction de la connaissance sur l'atteinte d'une exigence, les parties prenantes peuvent décider d'un choix de solution et le justifier par rapport à d'autres ;
- De définir sans ambiguïté et formellement ce qui doit être réalisé. Une définition claire d'une exigence permet sa compréhension dans toutes ses dimensions et permet aux parties prenantes de connaître exactement - compte tenu de la portée de l'exigence (domaine, dimensionnement...) – ce qui doit être satisfait (et, par extension, ce qui ne doit pas être satisfait) ;
- De s'assurer, à l'aide de méthodes idoines, qu'une exigence considérée est satisfaite et de démontrer aux parties prenantes que ce qui est satisfait correspond à ce qui est formulé (point précédent).

Ainsi, la maîtrise des exigences permet à une organisation de réaliser sa mission de manière cohérente pour atteindre ses objectifs. Cela ne garantit pas qu'aucune dérive ne sera constatée. En revanche, les parties prenantes pourront, en maîtrisant leurs exigences, engager les actions appropriées pour les corriger et tendre plus efficacement vers leurs objectifs. En ce sens, il est pertinent de développer et de mettre à disposition les moyens nécessaires à cette maîtrise pour les différents points exprimés précédemment.

Les travaux que nous développons s'intéressent à la spécification des exigences non fonctionnelles ainsi qu'à l'évaluation des exigences pour permettre à des parties prenantes de prendre des décisions concernant la réalisation de leur mission.

2.4. Les « -ilities »

Nous avons vu précédemment que les exigences sont décomposées en deux grandes catégories (fonctionnelle et non fonctionnelle) et que nous nous concentrons sur les non fonctionnelles. Parmi ces exigences, il existe une catégorie qui n'est pas liée au dimensionnement, à la définition d'interfaces ou encore aux aspects normatifs. Cette catégorie regroupe en effet l'ensemble des exigences non fonctionnelles qui, lorsqu'elles sont développées, vont fournir au système une capacité spécifique pour la réalisation de sa mission. Toutes ces exigences ne sont pas nécessairement développées au sein d'un système, mais selon ses spécificités. A titre d'exemple, nous pouvons citer l'interopérabilité qui représente la capacité pour « *des systèmes collaboratifs à interagir afin d'établir des comportements collectifs harmonieux et finalisés* » (ISO/TC, 2009) (DoD, 2011) (Chen, 2004). Cette capacité est particulièrement intéressante pour les types d'organisations appartenant aux réseaux d'organisations collaboratives (CNO, (Camarinha-Matos, 2009)) comme par exemple les organisations virtuelles pour lesquelles le développement de l'interopérabilité représente un enjeu important pour la réalisation de leur mission. En effet, sans cette capacité d'échange et de partage d'informations (de ressources ou encore d'activités) entre différents partenaires, les objectifs de la mission peuvent être impactés négativement (ex. temps de réalisation de la mission). Nous pouvons encore citer la sécurité qui permet à un système « *d'éviter de faire apparaître dans des conditions données, des événements critiques ou catastrophiques* » (Lefebvre, 2009) qu'elle soit interne ou externe. Cette capacité est développée majoritairement dans des organisations soumises à des événements critiques. Nous pouvons ainsi mentionner le développement de la cyber-sécurité qui est l'objet de nombreuses études ces dernières années du fait de l'augmentation des risques d'attaques (ex. rançongiciel comme WannaCry² ou Baltimore (ANSSI, 2017)).

Ainsi, les deux exigences mentionnées ci-dessus appartiennent à la catégorie des exigences non fonctionnelles nommée « -ilities » (pluriel de « -ility ») (ISO 15288) (Stevens, 1998) et représentent « *les exigences de développement, opérationnelles et de support auxquelles un programme doit répondre* » (INCOSE, 2012a). Ce sont « *les propriétés souhaitées des systèmes, telles que la flexibilité ou la maintenabilité (généralement, mais pas toujours, se terminant par « -ility »), qui se manifestent souvent après la première utilisation d'un système* » (DeWeck, 2012). Les « -ilities » ne sont ni des exigences de performances ni des exigences qui incluent des facteurs comme le dimensionnement en termes de taille ou de poids (DeWeck, 2012), (DeWeck, 2011), (Allen, 2001), (Ross, 2015) (Figure 3). En revanche, elles impactent fortement le système dans la réalisation de sa mission (comme l'interopérabilité dans les réseaux collaboratifs).

² Les liens suivants sont disponibles au 22 juillet 2019 :

- <https://blog.hiscox.fr/cyberattaques-top-10-2017/>
- https://www.ssi.gouv.fr/uploads/2018/04/rapport_annuel_2017_anssi.pdf

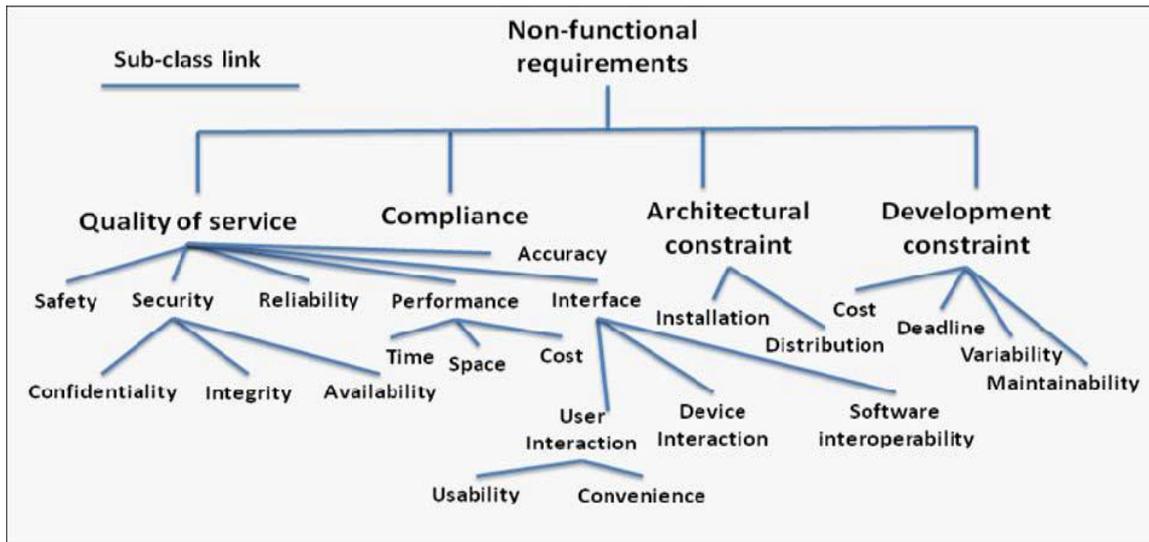


Figure 3. Exigences Non-Fonctionnelles et exemples d’« -ilities » impactant la qualité de service (safety, security, reliability) (Van Lamsweerde, 2009)

La littérature offre actuellement de nombreuses références sur les « -ilities » (Willis, 2011) (Ross, 2015) (Deweck, 2012) (Laprie, 1992) (Avizienis, 2001). On en compte actuellement de 74 à 83, ce nombre évoluant régulièrement au fur et à mesure de l’identification de nouvelles « -ilities ». Parmi celles identifiées dans la littérature, la résilience représente une capacité importante de réponse des systèmes susceptibles d’être soumis à des perturbations. A titre d’exemple, le référentiel de Willis identifie clairement la résilience comme une « -ility » (Figure 4).

Accessibility	Executability	Performability	Supportability
Accountability	Extensibility	Portability	Suitability
Adaptability	Evolvability	Practibility	Survivability
Administrability	Fidelity	Practicality	Tailorability
Affordability	Flexibility	Predictability	Testability
Agility	Functionality	Producibility	Traceability
Availability	Integratability	Recoverability	Trainability
Capability	Interoperability	Reliability	Transportability
Composability	Interpretability	Repeatability	Trustability
Configurability	Maintainability	Responsibility	Understandability
Compatibility	Manageability	Reusability	Upgradability
Demonstrability	Mobility	Scalability	Usability
Deployability	Modifiability	Serviceability	Verifiability
Durability	Operability	Stability	Vulnerability

Figure 4. Liste d’« ilities » identifiées par Willis incluant la résilience (Willis, 2011)

Dans le cadre de nos travaux, nous nous concentrons sur l’étude de la résilience au sein des organisations afin de leur permettre de développer cette capacité.

2.5. La résilience

L'Oxford Dictionary définit la résilience comme la « *capacité à se remettre rapidement de difficultés* ». Si elle caractérise initialement un matériau, le concept s'est depuis largement étendu à d'autres domaines (psychologie, environnement, économie...). Depuis, la définition s'est affinée et dans le cadre des systèmes, la résilience est définie comme « *la capacité d'un système à anticiper, survivre et à récupérer d'un stress causé par une situation de menace* » (Jackson, 2016). Selon (Caralli, 2010) la résilience est « *la capacité d'un système à récupérer des pertes de valeurs induites par les perturbations dans un délai de récupération autorisé* ». Ainsi, la résilience couvre les capacités d'anticipation, de survie et de rétablissement. La résilience est une exigence non fonctionnelle importante pour des systèmes faisant face à des événements perturbateurs. C'est le cas notamment des infrastructures critiques³ pour lesquelles les conséquences d'un incident et d'une interruption de service peuvent être particulièrement préjudiciables. Il est donc indispensable de permettre à ces systèmes (1) d'anticiper au mieux les événements prévus ou imprévus qu'ils sont susceptibles de subir (2), de continuer à fournir le service (même de manière dégradée et limitée dans le temps) lorsque l'évènement se concrétise, et (3) de rétablir le service. Ainsi, de nombreuses organisations appellent explicitement à la définition de stratégies basées sur la résilience pour faire face aux chocs imprévus et soudains. Le CGRI (Corporate Governance and Responsible Investment, 2011) décrit les stratégies de résilience comme nécessaires lorsqu'il existe une incertitude quant aux impacts des risques et aux conséquences catastrophiques. La littérature montre l'importance et la complexité de la résilience dans différents domaines. Selon (Curt, 2016), la résilience d'une infrastructure critique dépend de sa résilience :

1. Technique - capacité à remplir la fonction, à un niveau requis, pendant et après un événement indésirable ;
2. Organisationnelle - capacité des organisations à gérer les installations, maintenir les fonctions clés et prendre des décisions pour maintenir/améliorer la situation durant l'évènement ;

³ « *Les infrastructures critiques sont les installations physiques et des technologies de l'information, les réseaux, les services et les actifs qui, en cas d'arrêt ou de destruction, peuvent avoir de graves incidences sur la santé, la sécurité ou le bien-être économique des citoyens ou encore le travail des gouvernements des États.*

Les infrastructures critiques englobent :

- *les installations et les réseaux dans le secteur de l'énergie;*
- *les technologies des communications et de l'information;*
- *les finances (le secteur bancaire, les marchés des valeurs et les investissements) ;*
- *le secteur des soins de santé;*
- *l'alimentation;*
- *l'eau (réserves, stockage, traitement et réseaux);*
- *les transports (aéroports, ports, installations intermodales, chemins de fer et réseaux de transit de masse, systèmes de contrôle du trafic);*
- *la production, le stockage et le transport de produits dangereux (matériaux chimiques, biologiques, radiologiques et nucléaires);*
- *l'administration (services de base, installations, réseaux d'information, actifs et principaux sites et monuments nationaux) » (Sitruk, 1995) (Robert, 2009,a)*

3. Humaine - mesures spécifiquement conçues pour diminuer le niveau auquel les communautés et les juridictions gouvernementales pourraient souffrir de conséquences dues à la perte de services critiques du fait d'un événement, comportements humains au cours d'événements catastrophiques ;
4. Economique - capacité de diminuer les pertes économiques directes et indirectes, allocation de moyens, maintien de l'activité.

Enfin, selon (Jackson, 2016) « *l'ingénierie des systèmes traditionnels se concentre sur les exigences fonctionnelles et de performance avec des contraintes telles que la fiabilité et la sécurité considérées comme des caractéristiques liées et importantes* ». La résilience est définie comme une contrainte, souvent appelée « compétences ». Dans cet objectif, la conception pour les contraintes est de plus en plus reconnue comme une approche de conception importante (Jackson, 2016). Nous pouvons ainsi citer les travaux de (Ricci, 2014) qui exprime que « *la résilience, doit être identifiée tôt dans la conception conceptuelle plutôt que des facteurs supplémentaires à prendre en compte ultérieurement dans la conception* ».

En conséquence du contexte et des enjeux mis en avant dans les paragraphes précédents, nos travaux visent à définir, spécifier et développer les méthodes, concepts et moyens nécessaires, *in fine*, à l'évaluation de la propriété de résilience dans le but de concevoir des organisations possédant la capacité de résilience.

3. Problématique de l'évaluation de la résilience

Les différentes définitions et travaux de recherches sur les exigences non fonctionnelles et notamment la résilience mettent en évidence qu'elle est essentielle pour des organisations désireuses de faire face efficacement à des événements qui peuvent perturber leur fonctionnement. Dans ce contexte, notre étude de la problématique liée à la résilience portera sur trois points principaux : sa *gestion* (section 3.1), sa *caractérisation* (section 3.2) et son *évaluation* (section 3.3)

3.1. Nécessité de gérer la résilience dans le contexte des « -ilities »

Nous avons vu dans les parties précédentes l'importance pour des organisations de maîtriser les exigences et plus particulièrement leurs exigences non fonctionnelles. En effet, ces dernières - pour la catégorie des « -ilities » - offrent des capacités primordiales pour la réalisation de la mission d'une organisation. La résilience ne faisant pas exception, il est nécessaire de se doter des moyens permettant son développement dans les organisations.

L'investigation sur la résilience est récente et sa prise en compte comme une propriété cruciale au sein des systèmes est assez nouvelle (Ross, 2015). Elle est parfaitement identifiée comme une exigence non fonctionnelle appartenant à l'écosystème d'« -ilities » qu'il faut prendre en compte et étudier dans les systèmes. A cet effet, des primo travaux mettent en évidence l'existence de possibles relations au sein de cet écosystème d'« -ilities » sans toutefois pousser plus en avant les investigations (DeWeck, 2012) (Ricci, 2014) (Ross, 2011, a) (Ross, 2014). Ainsi, ces travaux laissent à penser que l'étude de ses relations, sans toutefois

en préciser la nature (dépendance, influence, compensation...), est essentielle à la maîtrise des exigences au sein d'un système.

Dans le cadre de nos travaux, nous pensons qu'il est indispensable d'étudier précisément les liens qui peuvent exister entre ces exigences non fonctionnelles et plus précisément les liens entre la résilience et d'autres exigences de l'écosystème d'« -ilities ». Cela doit fournir aux parties prenantes des informations supplémentaires en comparaison à la gestion classique de leurs exigences, *i.e.*, amélioration d'une exigence indépendamment de son environnement.

3.2. Nécessité de caractériser la résilience

La gestion de la résilience – c'est-à-dire la capacité d'un ensemble de parties prenantes à veiller à sa « bonne réalisation » - passe par sa caractérisation de manière précise. En effet c'est seulement en la caractérisant selon toutes ses dimensions que l'on peut en obtenir une vision précise et décider en conséquence. Les premières définitions proposées font ressortir l'aspect multi-dimensions de la résilience.

En effet, bien que dans son acceptation originale et globale la résilience puisse se résumer au rétablissement à un état de fonctionnement qualifié de normal, d'autres définitions caractérisent la résilience selon d'autres capacités. Ainsi, nous avons pu voir que la résilience peut concerner également :

- L'anticipation, c'est à dire la capacité à prévoir un évènement.
- La survie, c'est-à-dire la capacité de poursuivre son activité postérieurement à l'évènement.
- Le rétablissement, c'est-à-dire la capacité de revenir dans un état qualifié de stable, *i.e.*, son état original ou un état acceptable pour poursuivre une activité.

Ces trois capacités devraient donc être réunies pour qu'un système soit résilient. Il est donc nécessaire de caractériser précisément ces différents éléments et éventuellement d'en éliciter de nouveaux.

Premièrement cela doit permettre de connaître précisément l'exigence de résilience en fonction de ses capacités (anticipation, survie, rétablissement). Deuxièmement, cela doit permettre une meilleure gestion de la résilience selon chacune de ses capacités plutôt que d'évaluer une résilience globale du système. De même, contrairement à ce qui est souvent proposé dans la littérature, il est préférable de ne pas assimiler la résilience à sa seule capacité de rétablissement (d'anticipation ou de survie). Troisièmement, cela doit permettre de localiser précisément quels éléments de la résilience sont en défaut. Quatrièmement, cela doit permettre la mise en œuvre d'actions correctives efficaces afin d'améliorer la ou les capacités en défaut.

3.3 Nécessité d'évaluer la résilience

L'évaluation est un support à la décision. Chaque Alternative de Solution de Conception (ASC) est comparée aux autres et aux exigences des parties prenantes (Wood, 1989). Ainsi, permettre à des décideurs de prendre des décisions cohérentes s'appuie en partie sur la connaissance du niveau d'atteinte des exigences. Plus la connaissance du niveau d'une exigence est précise et plus les décisions sont adaptées. Inversement, la non connaissance de ce niveau peut conduire à des décisions prises tardivement (méconnaissance jusqu'à un évènement par exemple), non adaptées à la situation (incohérence avec les objectifs de la mission) et l'impossibilité de corriger efficacement à terme. Dans ce contexte, pour (Thomas-Vaslin, 2016), « *la résilience aux perturbations des systèmes complexes est une problématique majeure liée à l'historicité et la dynamique des systèmes évolutifs et les contextes dans lesquels ils évoluent, et qui ne peut faire l'objet d'évaluation réductionniste et causaliste* ». Dans ce sens, l'objectif d'évaluation de la résilience est pour améliorer l'acceptation de l'incertitude et évaluer les perturbations sur des systèmes, ainsi qu'aider à maintenir la performance du système.

L'évaluation de la résilience s'appuie sur différentes méthodes (qualitative ou quantitative) et selon le système (ex. système technique) et sa complexité (ex. entreprise). Cette évaluation n'est pas nouvelle et le développement de méthodes s'appuie majoritairement sur la mesure de la performance et de la qualité de service d'un système et selon différents aspects de la résilience (ex. rétablissement). En ce sens, les méthodes actuelles n'intègrent pas les interactions possibles entre la résilience et d'autres exigences non fonctionnelles appartenant à l'ensemble des « -ilities ». Ainsi, la méthode d'évaluation que nous proposons de développer s'intéresse à l'étude de l'écosystème d'« -ilities » et principalement à la caractérisation des relations avec la résilience et au développement d'un indicateur basé sur la nature de ces relations. Cette méthode ne cherche pas à se substituer aux méthodes existantes mais à venir en complément en donnant à des décideurs une évaluation de la résilience non pas seulement basée sur son impact sur la performance d'un système mais également sur la manière dont elle est impactée par d'autres exigences non fonctionnelles qui peuvent participer à sa réalisation (est-ce que la fiabilité d'un système participe à sa résilience et si oui dans quelle mesure cette fiabilité impacte le niveau de résilience ?).

4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les enjeux et la problématique de la résilience dans les organisations. Nous avons mis en évidence la nécessité de maîtriser un ensemble d'exigences nommé « -ilities » et supportant la réalisation de la mission des organisations. Plus précisément, nous nous intéressons à la résilience qui permet à des organisations de faire face efficacement à des évènements qui perturbent leurs fonctionnements. Il s'agit alors dans nos travaux de définir, spécifier et développer une méthode pour l'évaluation de la résilience pour concevoir des systèmes possédant la capacité de résilience mais également à des acteurs d'une organisation de la maîtriser en cours d'opération. Notre problématique d'évaluation de la résilience est ainsi décomposée en trois aspects pour considérer la résilience dans ses nombreuses dimensions à savoir sa gestion, sa caractérisation et son évaluation.

Chapitre 2

Définition et évaluation de la résilience : état de l'art

Résumé

Ce chapitre présente un état de l'art sur la résilience afin de la comprendre dans toutes ses dimensions et mieux l'appréhender pour notre contribution future. Dans cet objectif, nous présentons différentes définitions de la résilience pour mettre en évidence ces caractéristiques. Nous présentons également les travaux qui étudient la résilience comme une exigence non fonctionnelle. Enfin nous présentons des méthodes d'évaluation de la résilience, objet principal de nos travaux de recherche. L'analyse de ces différents aspects nous permet de mettre en avant notre vision de l'évaluation de la résilience et les points que nous considérerons ensuite dans notre méthode.

Table des matières du chapitre 2

1. Introduction	31
2. La résilience	31
2.1. Définitions	31
2.2. Dynamique de la résilience	35
a. Zone de pro-activité : l'anticipation	36
b. Zone de réactivité : la réponse et le rétablissement	37
3. Synthèse sur le concept de résilience	39
4. Evaluation de la résilience	41
4.1. Résilience comme exigence non fonctionnelle : l'écosystème d'« -ilities »	41
4.2. Méthode d'évaluation de la résilience	43
4.2.1. Panorama des méthodes d'évaluation de la résilience	44
4.3. Synthèse de la mesure de résilience	50
5. Conclusion.....	52

1. Introduction

Le premier chapitre a montré la nécessité d'évaluer la résilience lorsqu'une organisation souhaite anticiper ou faire face à des événements susceptibles de perturber son fonctionnement. Afin de développer une méthode d'évaluation de la résilience cohérente, il est nécessaire de comprendre et d'analyser la résilience sous différents aspects. Nous présentons dans un premier temps un bref historique de la résilience et un ensemble de définitions dans différents domaines d'applications afin d'identifier les caractéristiques majeures de la résilience. Ensuite, nous présentons et analysons comment la résilience est envisagée en termes de cycle de vie (dynamique de la résilience), c'est-à-dire les différentes phases temporelles qui sont considérées dans la littérature. Nous présentons également la résilience lorsqu'elle est appréhendée comme une exigence non fonctionnelle à satisfaire. A ce titre, nous introduisons et discutons la notion d'« -ilités » ainsi que les travaux qui mettent en évidence les relations qui peuvent exister entre elles. Nous exposons enfin différentes méthodes pour évaluer la résilience.

2. La résilience

2.1. Définitions

Une recherche simple dans le dictionnaire de l'académie française⁴ nous donne une définition de la résilience pour deux domaines. Tout d'abord dans le domaine technique, la résilience est définie comme une « *grandeur qui exprime la résistance aux chocs d'un matériau et qui correspond à l'énergie nécessaire par unité de surface pour provoquer la rupture d'un échantillon de forme et de taille déterminées* ». C'est effectivement dans le domaine technique que la résilience trouve son origine et pour lequel on obtient essentiellement ses définitions. Ensuite, une seconde définition est donnée dans le domaine de la psychologie avec « *l'aptitude à affronter les épreuves, à trouver des ressources intérieures et des appuis extérieurs, à mettre en œuvre des mécanismes psychiques permettant de surmonter les traumatismes* ». Cette deuxième définition nous montre que la notion de résilience s'étend à d'autres domaines mais en gardant toujours son essence originale à savoir la capacité de « quelque chose » à faire face à un événement. Cela se comprend aisément de par l'étymologie du mot résilience qui vient de latin « *resilio* » c'est-à-dire rebondir et on retrouve sa définition adaptée à l'heure actuelle dans des « *nombreux domaines, tels que la psychologie, la science des matériaux, le commerce ou encore l'écologie* » (Stoicescu, 2013). Le tableau suivant offre un aperçu large de la résilience telle qu'elle est définie dans différents domaines d'applications.

⁴ Le lien est accessible au 22 juillet 2019 :

- <https://www.dictionnaire-academie.fr/article/A9R2046>

Tableau 1. Définitions de la résilience selon différents domaines d'applications

Domaine	Référence	Définitions
Physique	Gordon, 1978	<ul style="list-style-type: none"> • Capacité de stocker l'énergie et de s'adapter sous une charge sans se rompre ni se déformer. • Capacité d'un métal à résister aux pressions et à reprendre sa structure initiale après avoir été déformé.
Système écologique	Holling, 1973	Capacité des systèmes à absorber les changements de variables d'état, de variables de conduite et de paramètres.
	Holling, 1996	Capacité tampon ou capacité d'un système à absorber les perturbations, ou ampleur des perturbations pouvant être absorbées avant qu'un système ne change de structure.
	Klein, 2003	Capacité d'un système ayant subi un stress à se rétablir et à retrouver son état d'origine ; plus précisément (i) la quantité de perturbations qu'un système peut absorber en restant dans le même état et (ii) le degré de capacité du système à s'auto-organiser.
	Walker, 2004	Capacité d'un système à absorber les perturbations et à se réorganiser en cours de changement de manière à conserver essentiellement la même fonction, la même structure, la même identité et les mêmes réactions.
Système social	Alliance, 2009	Capacité d'un système à tolérer les perturbations sans s'effondrer dans un état qualitativement différent.
	Adger, 2003	Capacité de persister (c'est-à-dire d'absorber les chocs et les stress tout en maintenant le fonctionnement de la société et l'intégrité des systèmes écologiques) et la capacité de s'adapter aux changements, aux circonstances imprévues et aux risques.
Individuelle (compétence, générale)	Masten, 1990	Processus, capacité ou résultat d'une adaptation réussie malgré des circonstances difficiles ou menaçantes.
	Butler, 2007	Adaptation dans des situations inhabituelles; trajectoire de récupération vers un fonctionnement de base après un défi.
Économique	Rose, 2007	<ul style="list-style-type: none"> • Résilience (dynamique) : vitesse à laquelle une entité ou un système se remet d'un choc important pour atteindre l'état souhaité.

		<ul style="list-style-type: none"> • Résilience économique statique : capacité d'une entité ou d'un système à maintenir sa fonction (ex. continuer à produire) en état de choc. • Résilience inhérente : capacité à gérer les crises. • Résilience adaptative: capacité (d'une entité ou d'un système) en situation de crise à conserver son fonctionnement sur la base d'ingéniosité ou d'effort supplémentaire.
	Pant, 2014	Capacité d'adaptation et de réponse d'une société afin d'éviter des pertes maximales suite à une perturbation. Cela se traduit par une capacité à résister à l'évènement perturbateur et la capacité de retour à une opérationnalité appropriée.
Environnemental	Quinlan, 2003	La résilience comprend (1) la quantité de changements qu'un système peut subir et conserve toujours essentiellement la même structure, la même fonction, la même identité et les mêmes réactions, (2) le degré de capacité d'un système à s'auto-organiser (et se réorganiser après une perturbation) et (3) le degré avec lequel un système exprime sa capacité d'apprentissage et d'adaptation.
	Liu, 2007	Capacité de conserver des structures similaires et de fonctionner après des perturbations pour un développement continu.
Système infrastructure	Royce, 2014	Capacité à réduire l'intensité et / ou la durée des événements perturbateurs. Son efficacité dépend de sa capacité à anticiper, à absorber, à s'adapter et / ou à récupérer rapidement d'un événement potentiellement perturbateur.
	Cardoso, 2015	Capacité à revenir dans son état initial ou à aller vers un état désiré après la perturbation. Cela nécessite de mettre en œuvre des capacités à se préparer à des évènements inattendus, permettant de faire face à la perturbation et de récupérer en maintenant un niveau de contrôle souhaité sur les structures et les fonctions.
	Clara-Villar, 2017	<ul style="list-style-type: none"> • Capacité de réduire l'ampleur et / ou la durée des événements perturbateurs. L'efficacité d'une infrastructure ou d'une entreprise résiliente dépend de sa capacité à anticiper, à absorber, à s'adapter et / ou à se remettre rapidement d'un événement potentiellement perturbateur.

	Ouyang, 2015	<ul style="list-style-type: none"> • Capacité conjointe de résistance (prévention et résistance) à l'ensemble des dangers, d'absorption du dommage initial et de récupération pour atteindre un état normal d'opérationnalité avec une prise en compte de la temporalité.
Réseau de transport	Nogal, 2016	Capacité d'un réseau de transport à absorber les perturbations, en maintenant un niveau de service afin d'atteindre un niveau de service équivalent ou plus important dans un délai raisonnable.
Systèmes informatiques	Laprie, 2008	Persistance de la fiabilité face aux changements ou, en incorporant la définition de la fiabilité.

Bien que ces définitions s'appliquent à des domaines différents, elles présentent toutes des caractéristiques communes (absorption, récupération, adaptation, réduction d'intensité, résistance, apprentissage, auto-organisation). Aussi d'une manière générale nous pouvons retenir la définition de Cutter qui définit la résilience de façon très générique et reprend l'ensemble de ces caractéristiques : « *la capacité à **anticiper**, à se **préparer**, à **réagir**, à **s'adapter** aux perturbations et à en **atténuer** les conséquences, ainsi qu'à **récupérer** rapidement et efficacement, y compris par le biais de la restauration, la préservation des services* » (Cutter, 2013a). Flynn (Flynn, 2008) quant à lui, définit la résilience selon quatre facteurs majeurs, toujours cohérents avec l'ensemble des définitions de la résilience et qui sont :

- La **robustesse** c'est-à-dire la capacité de continuer à fonctionner ou de rester debout face à une catastrophe ;
- L'**ingéniosité** c'est-à-dire la capacité de gestion d'une catastrophe - une fois qu'elle se réalise - avec habilité ;
- Le **rétablissement rapide** c'est-à-dire la capacité d'un retour à la normale aussi rapidement que possible après un événement ;
- Les moyens pour **assimiler et tirer les leçons** d'une catastrophe.

Nous pouvons citer également (Gibson, 2010) qui mentionne six principes qui définissent le concept de résilience tels que :

- *La résilience est un **résultat***. La résilience n'est pas un processus, un système de management, une stratégie ou une mesure prédictive, mais un trait qui peut être observé en réponse à une situation critique.
- *La résilience n'est **pas un trait statique***. La résilience d'une organisation ne sera pas constante mais dynamique, elle augmentera ou diminuera à mesure que le contexte change.
- *La résilience n'est **pas un trait unique***. La résilience découle d'une interaction complexe entre de nombreux facteurs. Lorsque les circonstances peuvent changer, la présence, l'importance et la contribution de chacun de ces facteurs à la résilience peut changer à son tour.

- *La résilience est multi-dimensionnelle.* La résilience peut être principalement décomposée en quatre dimensions : *technique, organisationnelle, économique et sociale.*
- *La résilience existe dans un éventail de conditions.* La résilience peut exister dans un éventail de conditions allant de la faible résilience (vulnérable) à la forte résilience.
- *La résilience est fondée sur une bonne gestion des risques.* La résilience est construite sur la base d'évaluation, traitement, surveillance et communication des risques.

Enfin, notons également que des travaux ont proposé une représentation graphique de la résilience en vue de son étude. A ce titre, (Bruneau, 2003) propose un triangle de la résilience mettant en évidence le niveau de qualité d'une infrastructure dans le temps par rapport (1) à l'amplitude des conséquences d'un événement sur cette qualité et (2) au retour à un niveau de qualité suite à l'événement.



Figure 5. Le triangle de la résilience de (Bruneau, 2003)

2.2. Dynamique de la résilience

Les définitions de la résilience présentées précédemment mettent en avant diverses caractéristiques à développer ainsi que la notion de temporalité de la résilience, cette dernière pouvant évoluer dans le temps (triangle de la résilience, trait dynamique). Ainsi, pour comprendre et assurer le développement des caractéristiques de la résilience au cours du temps de manière précise, les auteurs définissent un cycle de vie qui peut se représenter de la manière suivante :

- **Avant l'événement.** Cette phase vise à anticiper un événement. Elle consiste en la conception d'un système en mesure de subir un événement prévisible.
- **Pendant l'événement.** Cette phase consiste à gérer un événement en cours. Il s'agit de mettre en œuvre l'ensemble des options, activités et décisions pour atténuer les effets d'un événement.
- **Après l'événement.** Cette phase s'intéresse au rétablissement dans des délais rapides des fonctionnalités du système et du service fourni.

Ainsi, la résilience est envisagée, selon les auteurs, suivant ces différentes étapes (ou zones). Nous pouvons donc faire ressortir deux aspects majeurs de la résilience :

1. La proactivité du système (ante-événement) qui appartient au domaine de la gestion du risque (anticipation)

2. La réactivité (post-événement) qui appartient au domaine de la gestion de crise (réponse et rétablissement).

Ces différentes phases peuvent être positionnées sur le triangle de la résilience tel qu'il est proposé par (Bruneau, 2003) (Figure 6).

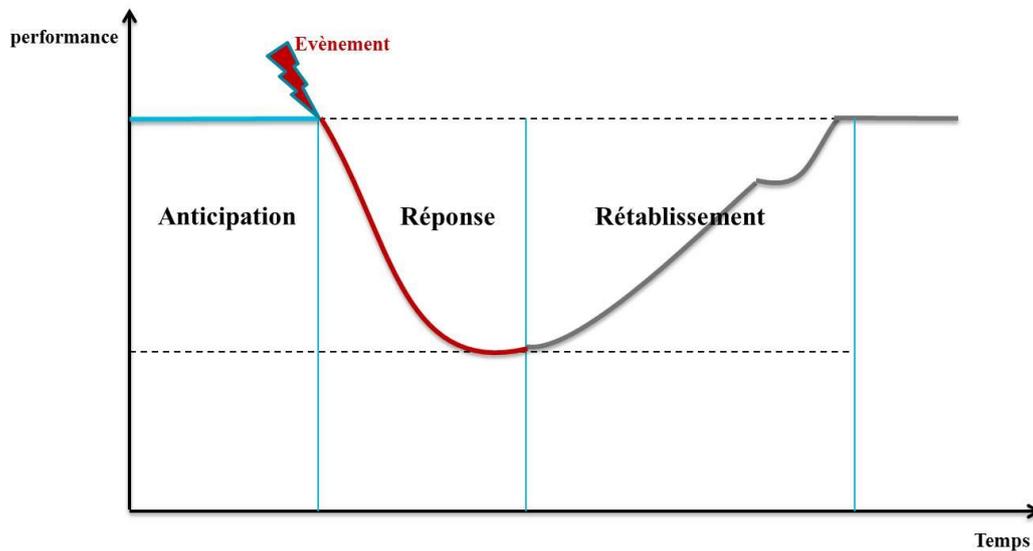


Figure 6. Dynamique de la résilience

a. Zone de pro-activité : l'anticipation

L'**Anticipation** est une capacité du système pour éviter les impacts d'un événement perturbateur. L'anticipation peut être décomposée en deux points : la **prévention** et la **préparation**.

La prévention est la capacité d'un système à prévenir une crise. Cette zone vise à **identifier** et à **minimiser** les risques pour le système, ses équipements, ainsi que les risques naturels (UNESCO, 2017). Cette activité consiste à (UNESCO, 2017 ; (Hollnagel, 2007) :

- Prendre soin de l'inspection des équipements de confiance et modifier les facteurs qui constituent un danger potentiel ;
- Établir des mesures de routine de vérification et de maintenance ;
- Installer des systèmes de protection et de sécurité automatiques ;
- Prendre des précautions spéciales pendant les périodes inhabituelles de risques accrus.

L'objectif est donc de permettre à un système de **prévenir** les menaces les plus probables et les plus prévisibles et d'en renforcer la résistance en mettant en œuvre différentes techniques (par exemple, identifier et minimiser les risques *via* des stratégies de sécurité).

La préparation est la capacité de « préparation à la gestion » (UNESCO, 2017). Elle consiste à :

- Élaborer un plan écrit de préparation, d'intervention et de rétablissement ;
- Maintenir le plan à jour et le tester ;

- Garder ensemble les fournitures et le matériel nécessaires en cas de catastrophe et les entretenir ;
- Constituer et former une équipe d'intervention en cas de catastrophe ;
- Distribuer le plan et la documentation aux emplacements appropriés sur et hors site, instituer des procédures pour informer les personnes concernées par la catastrophe.

L'objectif est de permettre à un système de se **préparer** à un événement (ex. installation de diverses *barrières de sécurité*, *protocoles de sécurité*, ressources de gestion des catastrophes, stratégies de sécurité ou de défaillances).

b. Zone de réactivité : la réponse et le rétablissement

La **Réponse** est réalisée lorsque l'événement se produit (UNESCO, 2017) et que le système est affecté (en termes de performance). Il s'agit dans ce cas de suivre les procédures d'urgence établies. Cette phase se distingue par deux aspects : l'**absorption** et l'**adaptation**.

L'**Absorption** est la capacité endogène d'un système à réduire les impacts négatifs causés par des événements perturbateurs et à en minimiser les conséquences avec moins d'efforts (Nan, 2017) ; (Royce, 2014). Cette capacité peut être améliorée pendant la phase de prévention en augmentant par exemple la robustesse ou encore la redondance du système. (Nan, 2017). L'absorption débute dès l'apparition de l'événement et dure jusqu'à la fin des effets initiaux et propagés.

L'**Adaptation** est la capacité endogène du système à s'adapter aux événements perturbateurs par le biais d'une auto-organisation afin de **minimiser** les conséquences. Elle peut être améliorée en utilisant des systèmes d'urgence (ex. alarme) (Nan, 2017). Selon (Holling, 2001), la capacité d'un système à s'adapter est liée à trois concepts fondamentaux : 1) la vulnérabilité aux chocs imprévisibles, 2) le potentiel du système à être modifié et 3) la flexibilité du système. L'adaptation a lieu lorsqu'un événement commence à apparaître et dure jusqu'au début du rétablissement du système.

Le **Rétablissement** est la capacité de « retour à la normale » selon (UNESCO, 2017). Il fait référence à la capacité du système à être rapidement réparé et rétabli, dans la mesure du possible, à un mode de fonctionnement normal et fiable qui répond aux exigences d'un niveau de qualité de service acceptable et souhaitable (Nan, 2017) (Royce, 2014). Selon (Cox, 2011), il existe quatre stratégies pour accélérer le rétablissement à savoir (Figure 7) :

- L'élimination des obstacles opérationnels (enlèvement des débris, simplification de la documentation et sûreté des fonctionnalités du système) ;
- L'efficacité de la gestion (compétences favorisant la restauration, la réparation et la reconstruction) ;
- La restauration rapide (moyens d'accès aux sites de réparation et contrats d'incitation) ; La substitution des intrants, substitution des importations, stocks (matériaux et main-d'œuvre nécessaires aux activités de réparation plutôt qu'aux opérations de production).

Au-delà de l'aspect temporel de la résilience au travers des zones décrites, la résilience est également liée à la qualité de service d'un système.

En effet, cette qualité dépend de la résilience et fluctue en fonction du niveau de résilience du système considéré. Si le système anticipe un ensemble d'événements, il peut poursuivre sa mission à un niveau de performance nominal.

Dans le cas contraire, il est susceptible de subir une perte de performance à laquelle il devra répondre. Ainsi, toujours dans le but de comprendre et de développer la résilience, il est nécessaire de connaître son impact sur les performances du système, *i.e.*, de ses possibles variations. L'objectif est de connaître le niveau de performance réelle en fonction du niveau de performance courante. A cet effet, les travaux de (Robert, 2009, b) définissent un ensemble d'états et de seuils par rapport à la qualité de service attendue. On retrouve alors :

- **L'état de référence.** C'est le niveau d'optimisation vers lequel le système cherche à tendre.
- **L'état normal.** Le système est performant puisqu'il remplit correctement sa mission.
- **L'état perturbé.** Le système est dans un état perturbé. Grâce à des actions mises en place, le système arrive à garder acceptable le délai de livraison de service ou arrive à en limiter les dégradations. Les dégradations restent acceptables, le système continue de remplir sa mission, mais il n'est plus performant.
- **L'état défaillant.** Malgré les actions mises en place, les dégradations deviennent inacceptables (ex. service inutilisable). Le système ne réalise plus sa mission avec les performances spécifiées.
- **L'état hors service.** Le système ne fonctionne plus.
- **Le seuil de performance.** Il correspond à la frontière entre l'état normal et l'état perturbé.
- **Le seuil de défaillance.** Il correspond à la frontière entre l'état perturbé et l'état défaillant.

En reprenant la courbe issue de la littérature (Nan, 2017) (Henry, 2012) et qui traduit la capacité de résilience en termes de performance d'un système et de temps, il est possible d'obtenir une vision des différentes phases de la dynamique de la résilience ainsi que des niveaux de performances du système (Figure 7). De la même manière, ces différentes zones ainsi que les différents seuils peuvent être utiles dans le cadre de l'évaluation de la résilience mais également pour l'interprétation du niveau de résilience obtenu.

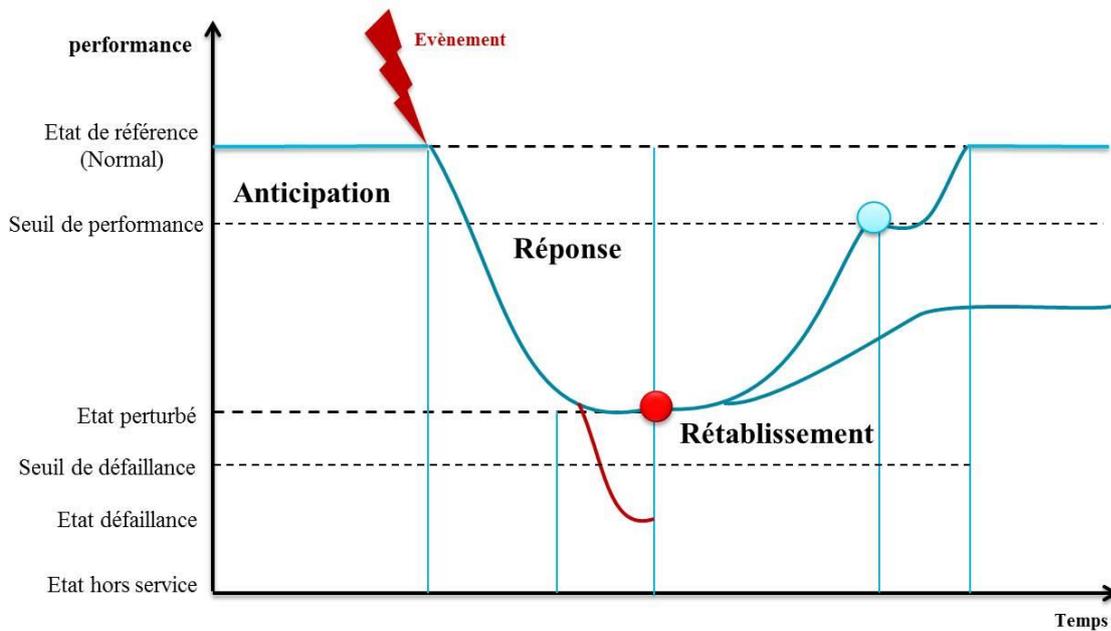


Figure 7. Dynamique de la résilience selon l'état du système

3. Synthèse sur le concept de résilience

La littérature offre de nombreuses définitions de la résilience. Au travers de notre recherche nous avons recensé pas moins de 70 définitions sans avoir la prétention de dresser une liste exhaustive. Celles-ci sont adaptées par les auteurs aux domaines d'applications dans lesquels la résilience sera mise en œuvre d'une part et par rapport aux événements perturbateurs susceptibles de se produire d'autre part. Cependant, ces définitions gardent toujours l'essence originelle de la résilience à savoir la capacité de faire face, de rebondir et la précisent avec différentes caractéristiques comme la préparation la prévention, l'absorption ou encore le rétablissement. C'est donc ces caractéristiques qu'un système cherchera à développer en priorité pour améliorer sa capacité de résilience.

Nous avons également vu que la résilience est caractérisée temporellement par une dynamique en trois phases pouvant impacter la performance d'un système (*cf.* courbe de la résilience). Bien que cette dynamique soit clairement identifiée, l'ensemble des auteurs ne considère pas la résilience selon toutes ces phases. Dans ce sens, certains peuvent considérer que la résilience n'est qu'une question d'anticipation ou encore de réponse et de rétablissement. Le tableau suivant synthétise le point de vue de différents auteurs concernant la résilience.

Tableau 2. Définition de la résilience selon sa dynamique et différentes visions

Référence	Anticipation		Réponse		Rétablissement
	Prévention	Préparation	Absorption	Adaptation	
• (Madni, 2009)	✓	✓	×	✓	✓
• (Westrum, 2006)	✓	✓	×	×	✓
• (Vogus, 2007) • (Mileti, 1999) • (Longstaff, 2005) • (Kahan, 2009)	×	×	✓	×	✓
• (Seville, 2008)	×	×	✓	✓	×
• (Bruneau, 2003) • (Nan, 2017) • (Royce, 2014) • (Gargiulo, 2016)	×	×	✓	✓	✓
• (Henry, 2012)	×	×	×	×	✓
• (Brudson, 2005)	✓	✓	✓	✓	×
• (Hollnagel, 2011) • (Cox, 2011) • (Cutter, 2013b)	✓	✓	✓	✓	✓

Cela ne remet pas en cause les définitions de la résilience vues précédemment, cependant dans le cadre de l'analyse de la résilience il s'agit alors de considérer des points de vue différents et de les agréger pour obtenir une vision globale de la résilience. Dans le cadre de nos travaux pour l'évaluation de la résilience nous considérons qu'il est nécessaire de traiter l'ensemble de ces phases. En effet, chacune présente un ensemble de caractéristiques et de capacités qu'il est nécessaire de maîtriser pour la résilience (Tableau 3). De plus, une capacité développée pour une phase particulière peut avoir un impact sur d'autres phases de la résilience. A titre d'exemple, les moyens mis en œuvre pour anticiper l'événement sont susceptibles d'être déployés pour répondre à l'événement et en limiter les conséquences.

Tableau 3. Synthèse des capacités attendues pour la dynamique de résilience

Dynamique résilience		Capacités attendues
Anticipation	Prévention	<ul style="list-style-type: none"> • Identifier les risques • Minimiser les risques
	Préparation	<ul style="list-style-type: none"> • Préparer à réagir
Réponse	Absorption	<ul style="list-style-type: none"> • Réduire les conséquences • Minimiser les conséquences avec moins d'efforts
	Adaptation	<ul style="list-style-type: none"> • S'adapter aux événements par auto organisation
Rétablissement	Rétablissement	<ul style="list-style-type: none"> • Revenir à un niveau de fonctionnement qualifié d'acceptable

4. Evaluation de la résilience

4.1. Résilience comme exigence non fonctionnelle : l'écosystème d'« -ilities »

Comme nous l'avons déjà abordé au premier chapitre les exigences sont des « *capacités qu'un système doit fournir ou une condition à remplir pour pouvoir répondre au besoin d'une partie prenante* » (Larman, 2002). Une exigence est donc définie comme étant : (1) une condition ou capacité dont un utilisateur a besoin pour résoudre un problème ou atteindre un objectif ; (2) une condition ou capacité qui doit être satisfaite ou possédée par un système, pour satisfaire un contrat, une norme, une spécification, ou tout autre document formellement imposé (Sharma, 2010). Il existe deux catégories principales d'exigences : les exigences fonctionnelles et les exigences non fonctionnelles. Les exigences fonctionnelles sont directement imputables à ce que fait le système (ses fonctions). Les exigences non fonctionnelles caractérisent une propriété ou une qualité désirée du système telle que sa performance, sa robustesse, sa convivialité, sa maintenabilité, etc.

Parmi les exigences non fonctionnelles, un ensemble des propriétés, est appelé « -illity » (ISO 15288, 2012) et représente « *des propriétés comme la maintenabilité ou la flexibilité et qui se manifeste souvent après la mise en condition opérationnelle* » (DeWeck, 2012). Nous pouvons mentionner la *flexibilité*, la *robustesse*, la *sécurité*, l'*interopérabilité* ou encore la *durabilité* qui sont des exigences qui vont supporter le système dans la réalisation de sa mission. Dans ce cadre, la résilience est identifiée comme une « -ility », c'est-à-dire une exigence que doit satisfaire un système pour faire face efficacement à des perturbations.

D'autres travaux sur les « -ilities » vont plus loin et identifient de possibles relations entre ces « -ilities ». C'est le cas notamment de DeWeck qui étudie la cooccurrence⁵ dans la littérature scientifique des « -ilities » pour proposer un graphe de corrélation comme dans la figure 8.

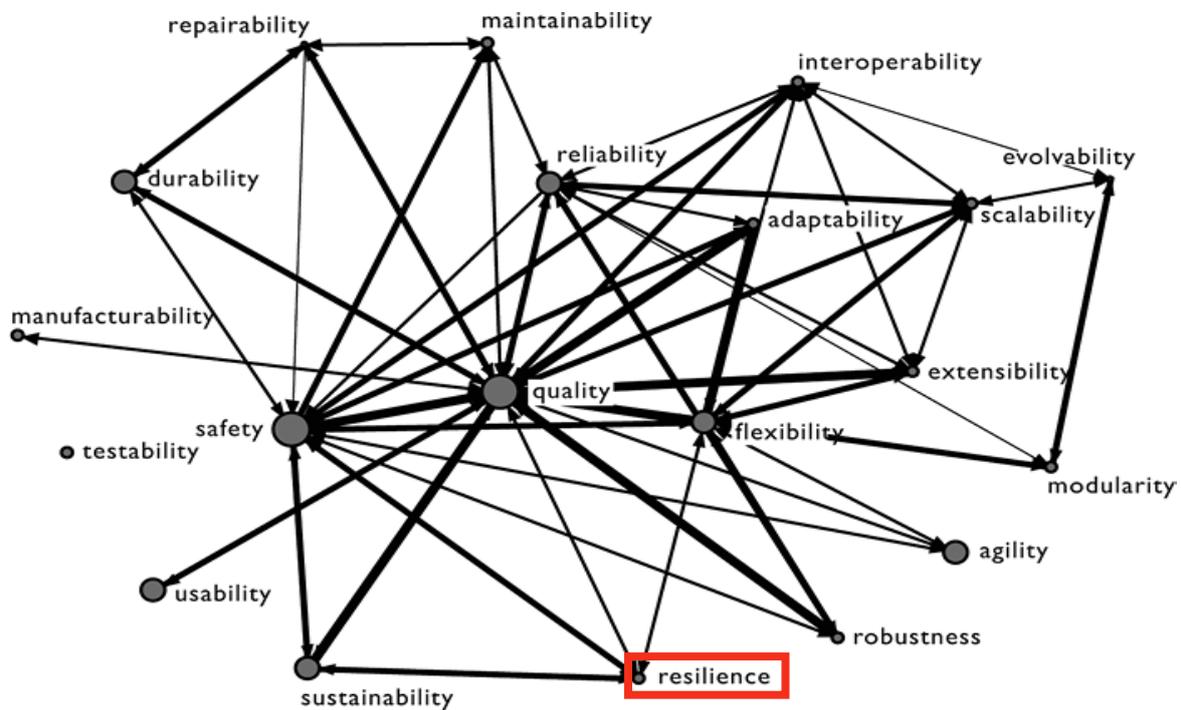


Figure 8. Réseau de corrélation des « -ilities » (DeWeck, 2012)

Ce graphe suggère donc l'existence de liens entre les « -ilities ». On constate par exemple que la résilience est liée à la qualité, la flexibilité ou encore la sécurité. En effet, comme les différentes définitions de la résilience l'ont montré précédemment, les concepts de résilience, flexibilité ou sécurité sont proches et on retrouve naturellement un lien dans la littérature. Cependant, comme mentionné par l'auteur, certains liens ne sont peut-être pas identifiés et pourraient être explicités par leur nature par exemple, *e.g.*, action d'une « -ility » sur une autre. A ce titre, De Weck évoque des relations de substitution (ex. possibilité de remplacer une « -ility » par une autre) ou encore de compromis (recherche d'un arrangement entre des « -ilities » en cas de conflit). Il peut alors être intéressant d'étudier plus précisément la nature des liens qui peuvent exister dans le but d'analyser la résilience. En effet, s'il existe des relations d'influence entre des « -ilities » - par exemple la modification d'une « -ility » sous l'influence d'une autre – nous pouvons postuler que la satisfaction d'une exigence est susceptible de dépendre de ces relations avec les autres « -ilities ». Dans le cadre de l'évaluation de la résilience cela signifierait qu'il est possible d'évaluer la résilience en analysant ce graphe des « -ilities » et les relations qui existent en son sein.

⁵ « Apparition dans un même énoncé de plusieurs éléments linguistiques distincts ; relation qui existe entre ces éléments. » (www.larousse.fr/dictionnaires/francais/cooccurrence)

4.2. Méthode d'évaluation de la résilience

Pour (Nan, 2017), « *l'analyse de la résilience est devenue une approche proactive visant à améliorer la capacité des infrastructures à prévenir les dommages avant événements, atténuer les pertes pendant les événements et améliorer la récupération des capacités après les événements* ».

De même, pour (Henry, 2012), la mesure de la résilience peut être utilisée pour le développement des systèmes résilients et des stratégies efficaces de résilience et, pour (Royce, 2014), elle permet :

- D'anticiper et d'absorber les défaillances ;
- De développer des moyens afin que le système s'adapte aux changements ;
- D'établir une réponse afin de retrouver un mode de fonctionnement acceptable le plus rapidement possible.

Ainsi, la mesure de la résilience apparaît comme une étape essentielle dans cadre du développement de système résilients ou de l'amélioration de la résilience. Cependant, le développement d'une méthode d'évaluation suffisamment générique et considérant tous les aspects de la résilience reste difficiles compte tenu de sa complexité. Les sections suivantes présentent un ensemble de méthodes pour évaluer la résilience. Elles s'intéressent aux différentes phases de la dynamique de la résilience, *i.e.*, avant, pendant et après l'événement. De même que pour les définitions, s'il est difficile de dresser un tableau complet des méthodes d'évaluation de la résilience⁶, nous présentons un ensemble de méthodes qui s'intéresse à :

- La performance ou la perte de performance d'un système avant et après l'évènement perturbateur (Royce, 2014) (Ouyang, 2015) (Reed, 2009) (Li, 2017) ;
- La mesure des pertes potentielles de fonctionnalités du système (Henry, 2012) (Zobel, 2011) ;
- La perte de qualité de service avant et après l'évènement perturbateur (Bruneau, 2003) (Cimellaro, 2010) ;
- La mesure de l'efficacité des barrières de sécurité (Enjalbert, 2011) ;
- La mesure des activités de récupération (Rose, 2005) (Cox, 2011).

De plus, selon (Hosseini, 2016), le processus d'évaluation de la résilience est classé en deux catégories : **quantitative** et **qualitative**. L'évaluation quantitative s'appuie sur des méthodes formelles et numériques d'évaluation et d'agrégation de critères pour fournir une valeur finale quantitative. L'évaluation qualitative repose sur des méthodes plus abstraites qui fournissent des résultats finaux qualitatifs. La Figure 9 détaille les approches d'évaluation de la résilience (qualitative et quantitative).

⁶ Nous avons identifié une trentaine de méthodes d'évaluation de la résilience dans la littérature.

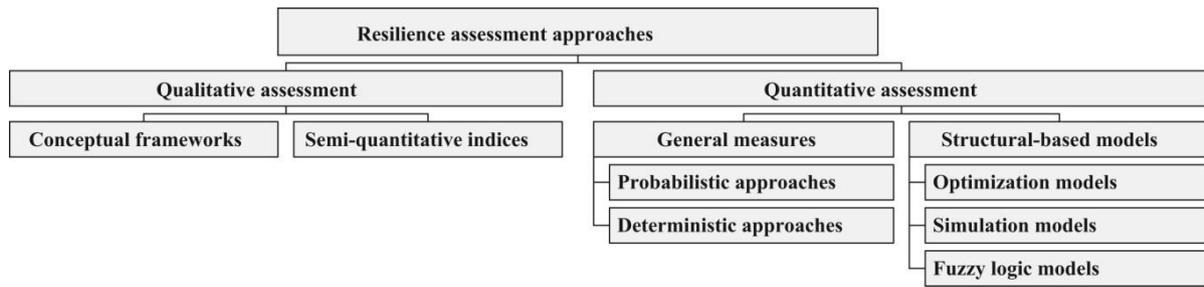


Figure 9. Classification des approches d'évaluation de la résilience (Hosseini, 2016)

Les approches quantitatives s'appuient sur la collecte de données principalement sous forme numérique. On retrouve dans cette catégorie les mesures générales de la résilience qui l'évaluent par la mesure de ses performances avant et après un évènement. Ces évaluations se basent sur les approches probabilistes et déterministes. On retrouve également les modèles basés sur la structure du système et son impact sur sa résilience. Ces méthodes s'appuient sur les modèles d'optimisation de simulation ou encore de logique floue.

Les approches qualitatives de la résilience s'appuient de leur côté sur le recueil d'informations qui fournissent une description du système. Ces approches sont souvent réalisées à partir d'entretiens ou encore d'observations. On retrouve dans cette catégorie les cadres conceptuels qui proposent d'évaluer la résilience selon différentes dimensions qui la caractérisent (capacité de restauration) et en fonction des informations disponibles sur le système. On retrouve également les indices semi-quantitatif développés à partir d'un ensemble de questions sur les caractéristiques du système et qui permettent à un expert de fournir un indice de résilience (ex. sur une échelle de 0 à 100).

4.2.1. Panorama des méthodes d'évaluation de la résilience

I. Mesure de la résilience via la performance du système (Royce, 2014)

La méthode développée par (Royce, 2014), indique que la mesure de la résilience est fonction des 3 capacités (absorption, adaptation et récupération) ainsi que du temps de récupération, à travers la mesure de la performance et son évolution. L'auteur utilise l'indicateur dans le secteur de réseau électrique. Il propose alors un facteur de résilience qui est quantitatif et formel. L'intérêt de cet indicateur est qu'il se base sur la mesure de performance après des perturbations par rapport à un niveau de performance stable dans le temps. Pour ce faire il calcule la capacité d'absorption et d'adaptation qu'il combine avec le facteur de rétablissement. La combinaison peut indiquer les performances du système à un moment donné et peut être comparée au niveau de performance d'origine à l'état stable. La figure 10, présente la relation entre le temps et la fonctionnalité du système. Après la perturbation initiale, il y a un temps initial pour les actions post-perturbation. La courbe présente la résilience par rapport à la capacité d'absorption et d'adaptation.

$$P_i(S_p, F_r, F_d, F_o) = S_p \frac{F_r F_d}{F_o F_o} \quad \text{où } S_p = \begin{cases} (t_\delta t_r^*) \exp[-a(t_r - t_r^*)] & \text{for } t_r \geq t_r^* \\ (t_\delta / t_r^*) & \text{otherwise} \end{cases}$$

$\frac{F_d}{F_o}$ = capacité d'absorption $\frac{F_r}{F_o}$ = capacité d'adaptation;

Sp	Facteur de rétablissement
Fo	Performance stable
Fr	Performance après l'état étudié
a	Paramètre décroissant de résilience
tr	Temps fin de rétablissement
tr *	Temps de récupération initiale
tδ	Temps de perturbation
Fd	Performance après la perturbation

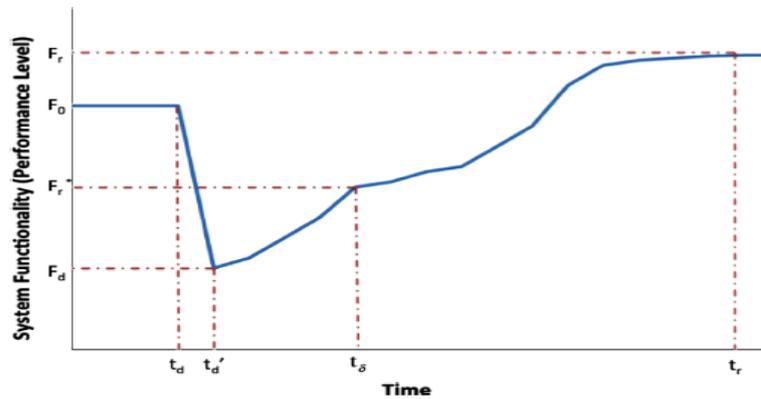


Figure 10. Relation entre le temps et la performance du système

II. Mesure de la résilience via la mesure de la performance (Ouyang, 2015)

Ouyang présente un indicateur de résilience qui est construit sur les performances du système pendant une période allant de 0 à T, ce qui peut inclure aucuns ou plusieurs événements perturbateurs, comme indiqué dans la courbe ci-dessous. Chaque événement couvre une étape de prévention des catastrophes, une étape de propagation des dommages et une phase d'évaluation et de récupération. Ces trois étapes peuvent refléter respectivement les capacités de résistance, d'absorption et de restauration du système face à un évènement, et ses capacités de réaction de 0 à T. L'ensemble détermine la résilience du système pendant cet horizon. L'avantage de cette méthode est l'utilisation d'un long intervalle de temps de 0 à T ce qui rend la mesure de résilience obtenue comparable aux performances initiales du système. Cependant, la limite est que la mesure ne peut pas refléter la capacité d'un système au rétablissement après les perturbations ce qui est une caractéristique importante de la résilience. La mesure de résilience est quantifiée en fonction de la courbe de performance, résilience courante $P_T(t)$ et de la courbe de performance réelle $PR(t)$. Dans le cas où on considère $P_T(t)$ égale à 1 et quand un évènement à une occurrence gouvernée par une loi de poisson alors la résilience s'exprime :

$$R(T) = \frac{\int_0^T P_R(t) dt}{\int_0^T P_T(t) dt}$$

$P_T(t)$: résilience courante

$PR(t)$: performance réelle

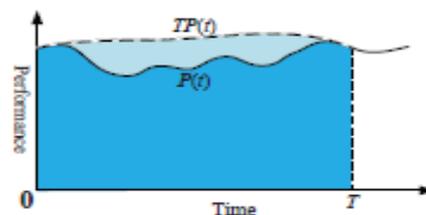


Figure 11. Mesure de la résilience via la performance du système (infrastructure)

III. Mesure de la résilience via les fonctionnalités (Henry, 2012)

Henry (2012), propose une méthode basée sur la mesure des conséquences des perturbations et de l'impact des fonctionnalités du système sur l'atténuation de ces conséquences. L'indicateur de résilience $\mathcal{R}_F(t_r|e_j)$ correspond à un facteur de réalisation des fonctions $F(t_r|e_j)$ évaluée à l'instant t_r (où $t_r \in (t_d, t_f)$) dans le cas d'un événement perturbateur e_j et peut être calculé par la formule présentée dans la figure suivante. La mesure indique la proportion de récupération depuis l'apparition de l'évènement perturbateur. La figure 12, présente le rapport entre la courbe de performance et l'axe temporel pour caractériser la performance du système.

$$\mathcal{R}_F(t_r|e_j) = \frac{F(t_r|e_j) - F(t_d|e_j)}{F(t_0) - F(t_d|e_j)}$$

$F(t_r|e_j)$: performance du système à t_r (compris entre t_d et t_f) pour l'évènement e_j .

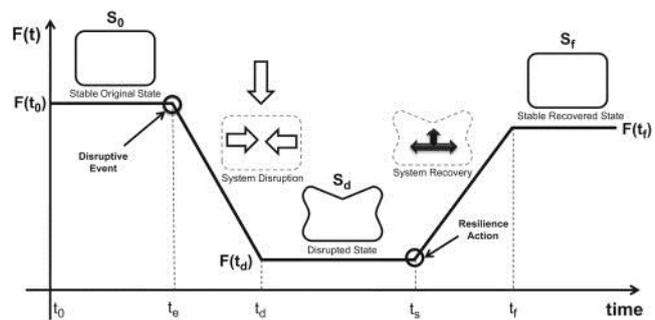


Figure 12. Mesure de la résilience via la transition de la fonction (Henry, 2012)

IV. Mesure de la résilience via les pertes de fonctionnalités (Zobel, 2011)

Zobel présente une approche de mesure quantitative de la résilience en présence de multiples événements. Il étend les concepts du triangle de résilience développés par (Bruneau, 2003) et la résilience prédictive en cas de catastrophe. La méthode se base sur des cas de catastrophes soudaines et sur l'impact initial de chaque événement ainsi que le temps disponible pour travailler à la récupération du système avant que le prochain événement ne se produise. A ce titre, il propose un modèle mathématique qui évalue la résilience. La fonction de résilience suppose qu'il s'agit d'estimations déterministes du comportement futur attendu du système. La fonction de résilience prédite réelle pour la paire ordonnée (X, T) est ensuite donné par l'équation de R(X,T), qui est l'équation d'une hyperbole rectangulaire centrée sur (0,0) et avec des asymptotes situés sur les axes X et T. Ainsi, pour une valeur de résilience fixe, R (et un T * fixe), l'ensemble de toutes les combinaisons possibles de X et T décrit une hyperbole. En ce qui concerne les facteurs utilisés pour caractériser la résilience, le temps de récupération (T) représente une mesure de la rapidité et 1 - X fournit une mesure de la robustesse. La méthode se concentre sur une fonction de la quantité prévue de perte initiale et du temps de récupération associé pour un événement futur, les deux valeurs étant estimées en fonction des informations disponibles avant que l'évènement ne se produise réellement. La valeur de perte initiale, X, est mesurée en pourcentage de la fonctionnalité totale disponible du système, et le temps de récupération (T) est mesuré dans une unité de temps pertinente, telle que les semaines ou les mois. Le calcul de la résilience prédite est basé sur l'approximation de la zone sous la courbe de qualité représentée dans la figure ci-dessous. La limite supérieure stricte du temps de récupération (T*) est utilisée comme fin de l'intervalle de temps considéré.

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

R(X, T) : Valeur de résilience

X : pourcentage de fonctionnalités perdues après l'évènement, $X \in [0 ; 1]$

T : temps de récupération totale

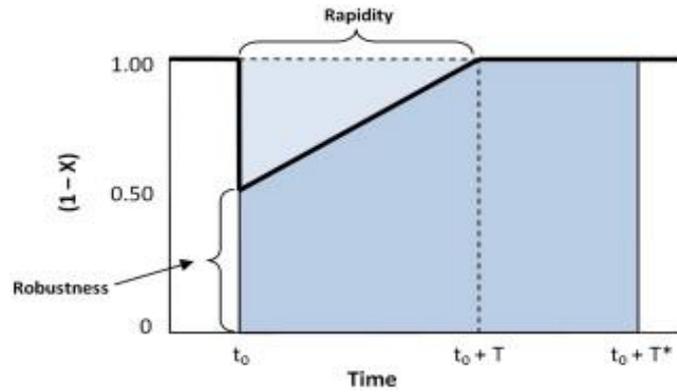


Figure 13. Mesure de la résilience via les pertes de fonctionnalités

V. Mesure de la résilience via la mesure l'opérationnelle (Cox, 2011) (Rose, 2005)

Cox propose une mesure opérationnelle de la résilience économique statique directe (DSER – Direct Static Economic Resilience), en faisant la différence entre la production courante et la réduction de production après un évènement. La mesure correspond à ce que les économistes appellent l'analyse de l'«équilibre partiel». DSER est le pourcentage d'évitement du maximum de perturbation économique qu'un choc particulier pourrait provoquer.

$$DSER = \frac{\% \Delta DY_m \pm \% \Delta DY}{\% \Delta DY_m}$$

$\% \Delta DY_m$: variation maximale en pourcentage de la production directe

$\% \Delta DY$: variation en pourcentage estimée de la production directe

Figure 14. Direct Static Economic Resilience

VI. Mesure de la résilience via la mesure de la qualité de service (Bruneau, 2003)

L'approche de (Bruneau, 2003) est basée sur la notion qu'une mesure, Q (t), qui varie avec le temps, est définie pour la qualité de l'infrastructure d'une communauté. En particulier, les performances peuvent aller de 0% à 100%, 100% signifiant aucune dégradation du service et 0%, aucun service disponible. Cette approche se concentre sur la mesure de la perte de résilience d'une communauté suite à un évènement perturbateur. Les auteurs considèrent la perte de résilience comme la perte de qualité d'un ou plusieurs services à un temps t. Si un choc se produit au moment t0, il peut causer des dommages suffisants au système de sorte que la qualité en soit immédiatement réduite. La restauration du système devrait se faire avec le temps, comme indiqué dans la figure ci-dessous, jusqu'au moment t1 où elle est complètement rétablie (indiquée par une qualité de 100%).

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

t_0 : Temps auquel l'évènement se produit

t_1 : Temps pour retrouver un niveau satisfaisant

L : Qualité initiale du service est égale à 100

RL : Intégrale de la fonction de perte de performance

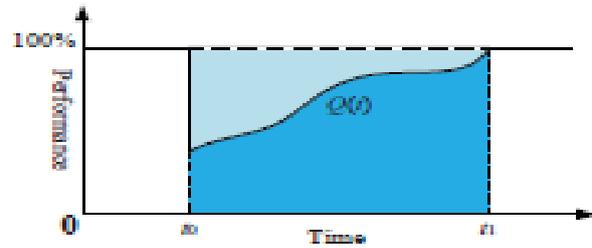
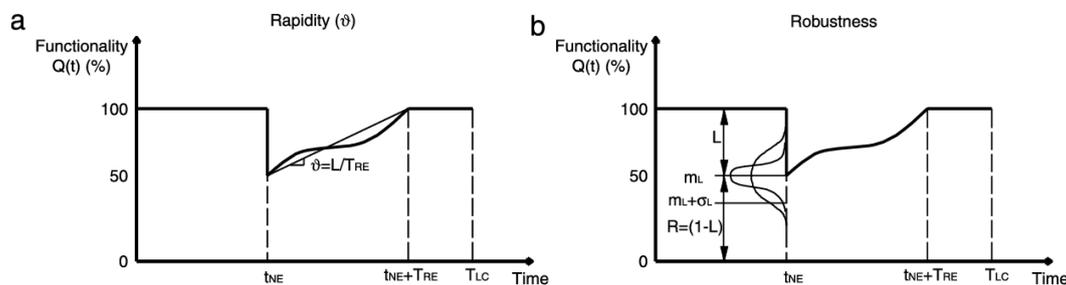


Figure 15. Mesure de la via la qualité de service

VII. Mesure de la résilience via la mesure de la qualité de service (Cimellaro, 2010)

La méthode est basée sur la qualité de service avant et après l'apparition de l'évènement perturbateur. L'auteur définit quatre dimensions sur lesquelles la résilience peut être améliorée : la robustesse, l'ingéniosité, la redondance et la rapidité de réaction face aux perturbations. Sur la figure 16 (a), la rapidité représente la capacité à répondre et à atteindre les objectifs en temps voulu afin de limiter les pertes et d'éviter des perturbations futures.

La robustesse sur la figure 16 (b) est la capacité de garder la variabilité des pertes dans une bande étroite, indépendamment de l'évènement lui-même. Mathématiquement, il représente la pente de la courbe de fonctionnalité pendant le temps de récupération par l'équation présentée dans la figure 16 (c) :



$$R = \alpha \int_{T_{LC}} \frac{Q_1(t)}{T_{LC}} dt + (1 - \alpha) \int_{T_{LC}} \frac{Q_2(t)}{T_{LC}} dt$$

(c)

$\frac{Q_1(t)}{T_{LC}}$: Rapidité et $(1 - \alpha)$: Robustesse

α : facteur de pondération de la qualité du service

$Q_1(t)$: qualité de service avant l'évènement

$Q_2(t)$: qualité de service après l'évènement

T_{LC} : temps de contrôle du système

Figure 16. Dimensions de la résilience : Rapidité (a), robustesse (b) et équation (c)

VIII. Mesure de la résilience via l'efficacité des barrières de sécurité (Enjalbert, 2011)

La méthode présente un indicateur de sécurité du système au temps t qui mesure le différentiel de résilience globale entre le début de l'influence de la perturbation (t_b) et la fin de l'influence de la perturbation (t_e). La sécurité du système, afin d'évaluer la résilience du système, est déterminée par la somme de l'effet de facteurs qui peuvent l'affecter, comme la vitesse.

$$Global\ resilience = \int_{t_b}^{t_e} local\ resilience = \int_{t_b}^{t_e} \frac{dS(t)}{dt}$$

t_b : Début de l'influence de la perturbation ;

t_e : Fin de l'influence de la perturbation

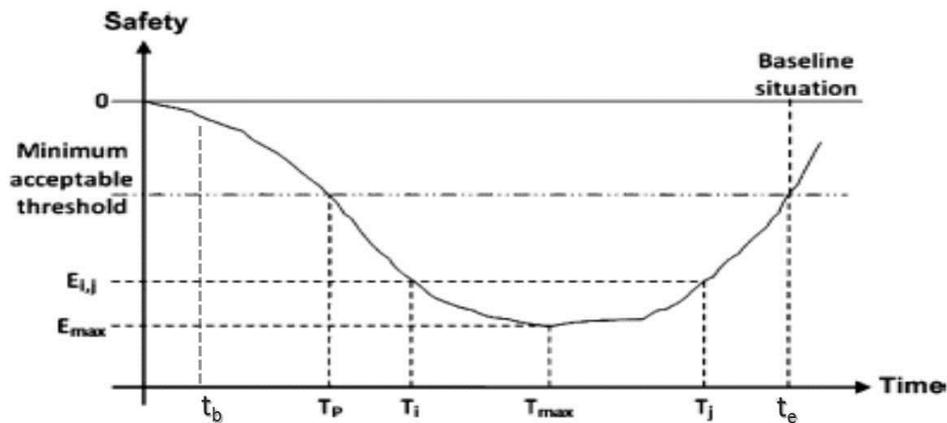


Figure 17. Mesure de résilience via l'efficacité des barrières de sécurité

IX. Mesure de la résilience via le comportement du système (Li, 2017)

Li présente une méthode de mesure de résilience pour les réseaux de chaîne d'approvisionnement qui se concentre sur le comportement du système après la perturbation, et le moment où la perturbation se produit. Le temps de récupération maximal admissible déterminé par les utilisateurs est utilisé comme l'échelle de temps, il n'est pas nécessaire de récupérer complètement à la fin de l'intervalle de temps. R est la résilience du système, t_0 est le moment où la perturbation se produit et les performances du système commencent à décliner et T_a est le temps de récupération maximal autorisé déterminé par les utilisateurs. La figure ci-dessous présente la résilience du système en présence d'une perturbation spécifique. Elle peut être exprimée sous la forme du rapport de l'intégrale de $Q(t)$ dans la limite maximale permise de temps de récupération T_a à l'intégrale de la performance dans l'état normal. La figure 18 illustre deux situations types, l'une dans laquelle les performances du système reviennent à leur niveau initial dans le délai de récupérations allouées et l'autre non.

$$E(\mathbb{R}) = \frac{E \left[\int_{t_0}^{T_a+t_0} Q(t) dt \right]}{T_a}$$

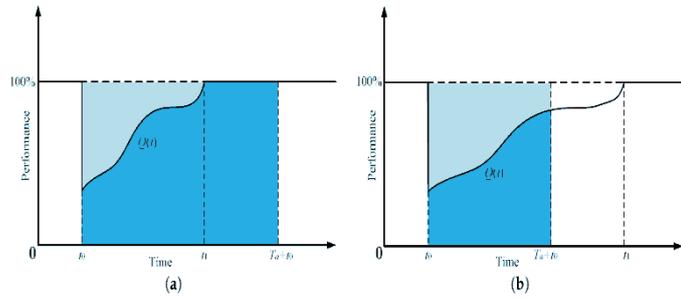


Figure 18. Mesure de la résilience pour les systèmes de distribution d'énergie

X. Mesure de la résilience via le temps de perturbation et de récupération (Reed, 2009)

Reed présente une méthode (appliquée aux infrastructures en réseau) qui combine les éléments des mesures de résilience basés sur MCEER (Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research), des modèles entrées-sorties et des fragilités structurelles. $Q(t)$ est la capacité du système pleinement opérationnel (maximum de sa performance) et l'intervalle de temps considéré ($t_e - t_s$) peut être défini de manière flexible. Cependant, la méthode de détermination de l'intervalle de temps n'est pas fournie et la signification physique de la mesure n'est pas claire.

$$R = \frac{\int_{T_s}^{T_e} Q(t) dt}{T_e - T_s}$$

T_e : temps en jours avant l'événement
 T_s : temps en jours après l'événement

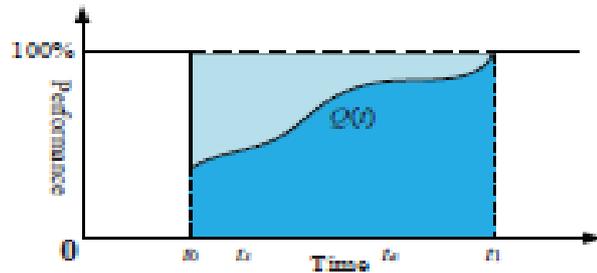


Figure 19. Mesure de la résilience pour les infrastructures en réseau

4.3. Synthèse de la mesure de résilience

Il existe actuellement un nombre important de méthodes d'évaluation de la résilience. Nous avons présenté un ensemble de méthodes proposant divers indicateurs et appliqué à différents domaines. Le tableau suivant synthétise ces méthodes – toutes de type quantitatif - selon les critères suivants : la zone de la résilience considérée et la caractéristique du système évaluée. Nous constatons ainsi que ces méthodes considèrent souvent deux ou trois phases de la résilience. Cela se comprend facilement puisqu'au vu des définitions de la résilience, tous les auteurs ne considèrent pas que la résilience possède 3 phases distinctes. Ensuite, aucune de ses méthodes ne considère une possible relation entre la résilience et d'autres exigences liées à cette dernière comme le montre le diagramme de DeWeck (*c.f.* figure 8). A ce titre, seul Zobel met en évidence - au travers de la courbe de résilience - un lien possible avec la robustesse au cours de la phase de réponse. Enfin, la majorité des méthodes s'appuie sur des opérateurs mathématiques produisant un résultat numérique. Ces outils s'avèrent précis et efficaces mais peuvent être difficilement exploitables par des acteurs de terrain qui doivent

disposer facilement et rapidement du niveau de résilience de leur système pour prendre des décisions en conséquence. Le tableau 4 synthétise les méthodes de mesure de la résilience les plus courantes dans la littérature.

Tableau 4. Synthèse des méthodes de mesure de la résilience

Référence	Zone étudiée	Évaluation
Royce, 2014	Réponse Rétablissement	Pertes de performance
Ouyang, 2015	Anticipation Réponse	Pertes de performance
Henry, 2012	Rétablissement	Pertes potentielles
Zobel, 2011	Réponse Rétablissement	Pourcentage de pertes potentielles
Cox, 2011 Rose, 2005	Anticipation Réponse Rétablissement	Mesure opérationnelle Pourcentage de Pertes potentielles
Bruneau, 2003	Réponse Rétablissement	Qualité service
Cimellaro, 2010	Réponse Rétablissement	Qualité service
Enjalbert, 2011	Réponse Rétablissement	Mesure de l'efficacité des barrières de sécurité
Li Ruiying, 2017	Réponse Rétablissement	Mesure le comportement et la performance
Reed, 2009	Réponse Rétablissement	Mesure de la capacité opérationnelle

Ainsi, dans le cadre de nos travaux, il apparaît pertinent de développer une méthode qui :

- considère l'ensemble des phases de la résilience. Il s'agit dans la méthode que nous proposons d'évaluer la résilience sur chaque phase de sa dynamique pour avoir une vision précise de la résilience et faciliter la prise de décision par des acteurs que ce soit sur l'anticipation, la réponse ou le rétablissement.
- s'appuie sur l'analyse de relations entre les différentes « -ilities ». En effet, la majorité des méthodes analyse la résilience suivant l'impact sur la performance du système. Hors, nous avons vu précédemment avec les principes de (Gibson, 2010) que la résilience n'est pas un trait unique et dépend de l'interaction de nombreux facteurs. Ainsi, ces méthodes sont tout à fait pertinentes, mais elles ne tiennent pas compte d'une évaluation de la résilience par rapport à d'autres exigences qui peuvent impacter sa réalisation. Nous proposons donc de développer une méthode qui se veut complémentaire aux autres en analysant les relations entre exigences.
- soit qualitative. Nous cherchons à obtenir une évaluation de la résilience qui soit facile à exploiter pour des acteurs de terrain c'est-à-dire rapide, fiable, compréhensible et interprétable et explicable.

5. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté la définition de la résilience telle qu'elle est appréhendée dans différents domaines ainsi que ses différentes dimensions à prendre en compte pour son développement. De même, la présentation de différentes méthodes d'évaluation nous montre que la résilience est une propriété (1) qu'il est important d'évaluer pour pouvoir être maîtrisée et (2) qu'elle est évaluée de différentes façons (qualitative *vs.* quantitative) et selon ses différentes dimensions (anticipation, réponse, rétablissement). À partir de l'analyse des différents concepts et des définitions de la résilience, des différentes méthodes d'évaluation et de leurs mécanismes, nous présentons dans les chapitres suivants notre méthode d'évaluation de la résilience.

Chapitre 3

Cartographies de la résilience

Résumé

Ce chapitre présente les cartographies de la résilience en vue de son évaluation. En nous appuyant sur les travaux de DeWeck (2012), nous procédons à une étude et une analyse de l'« écosystème d' « -ilities » ». Ainsi, nous nous intéressons à la résilience et aux relations qu'elle peut avoir avec les autres exigences et développons deux cartographies : des relations et de la dynamique. La première cartographie identifie et définit la relation entre la résilience et les « -ilities ». La seconde cartographie s'intéresse au positionnement des « -ilities » par rapport aux différentes phases de la dynamique de la résilience. C'est sur la base de ces deux cartographies que sera défini par la suite un ensemble d'indicateurs pour évaluer la résilience.

Table des matières

1. Introduction	55
2. Vers la définition des cartographies de la résilience : concepts	55
3. Cartographie des relations de résilience	57
3.1. Existence de la relation	58
3.2. Nature de la relation	62
3.3. Orientation de la relation	63
3.4. Cartographie.....	64
4. Cartographie de la dynamique de la résilience.....	64
4.1. Zone d'anticipation : capacités attendues et exemples de positionnement.....	66
4.2. Zone de réponse : capacités attendues et exemples de positionnement	68
4.3. Zone de rétablissement : capacités attendues et exemples de positionnement	70
4.4. Cartographie	72
5. Conclusion	76

1. Introduction

L'objectif final de nos travaux est la définition et la spécification d'une méthode pour évaluer la résilience de manière précise et aux regards des exigences non fonctionnelles qu'elle est susceptible de convoquer pour assurer sa satisfaction. Nous avons mis en avant, dans les parties précédentes, la nécessité de *maîtriser* et d'*optimiser* cette capacité afin de gérer efficacement des événements perturbateurs et de maintenir des niveaux de services et de performances acceptables. En outre, nous avons montré au travers de différentes définitions de la résilience que cette capacité fait appel aux notions de *résistance*, d'*absorption*, d'*adaptation* ou encore de *récupération* (Haimès, 2009), (Hollnagel, 2013) (Royce, 2014). Ainsi, son évaluation peut s'avérer complexe et l'analyse des différentes méthodes développées a permis de constater qu'elles (1) se concentrent sur des domaines d'applications spécifiques (ex. infrastructures critiques, économie, réseaux de transport (Royce, 2014) (Rose, 2007) (Nogal, 2016)), (2) ne considèrent pas toutes les phases du cycle de vie de la résilience (ex. rétablissement (Royce, 2014)) et (3) ne s'intéressent pas aux relations que la résilience peut avoir avec d'autres propriétés non fonctionnelles attendues (seul (Zobel, 2011) établit un lien entre la robustesse et le temps de récupération).

Nous choisissons dans nos travaux d'évaluer la résilience selon le réseau d'« -ilites » développé par DeWeck c'est-à-dire en s'intéressant aux relations entre la résilience et d'autres « -ilites » au sein de cet écosystème. L'objectif de ce chapitre est de mettre en évidence et de caractériser les relations dans ce réseau en vue, à terme, d'évaluer la résilience. A cette fin, nous présentons dans un premier temps les concepts nécessaires à la définition de ces relations. Ensuite nous présentons, ce que nous nommons les cartographies de la résilience résultantes de l'analyse de l'écosystème, à savoir une cartographie des relations et une cartographie de la dynamique de la résilience.

2. Vers la définition des cartographies de la résilience : concepts

Afin d'évaluer la résilience selon l'écosystème d'« -ilites », il est nécessaire d'identifier et de définir l'ensemble des relations que la résilience peut avoir avec d'autres « -ilites ». Sans ce premier travail d'analyse, le développement d'une méthode d'évaluation basée sur cette hypothèse serait biaisé soit par exemple en omettant une relation ou encore en ne définissant pas clairement une relation. Ainsi, pour déterminer cette cartographie nous nous appuyons sur :

1. Les relations identifiées dans les travaux de DeWeck (figure 20). En effet, ces travaux présentent la résilience et mettent en évidence les liens de la résilience avec d'autres « -ilites ». Ces relations sont identifiées sur la cooccurrence des « -ilites » dans la littérature. Cependant, les « -ilites » restent souvent traitées de manière isolée. Notre recherche suggère qu'investiguer sur les « -ilites » dans cet ensemble peut être plus significatif que l'étude des cas isolés. Notre approche nous permet donc d'analyser et de formaliser dans un premier temps plus de vingt « -ilites » en termes de nature de relation et d'interdépendance.

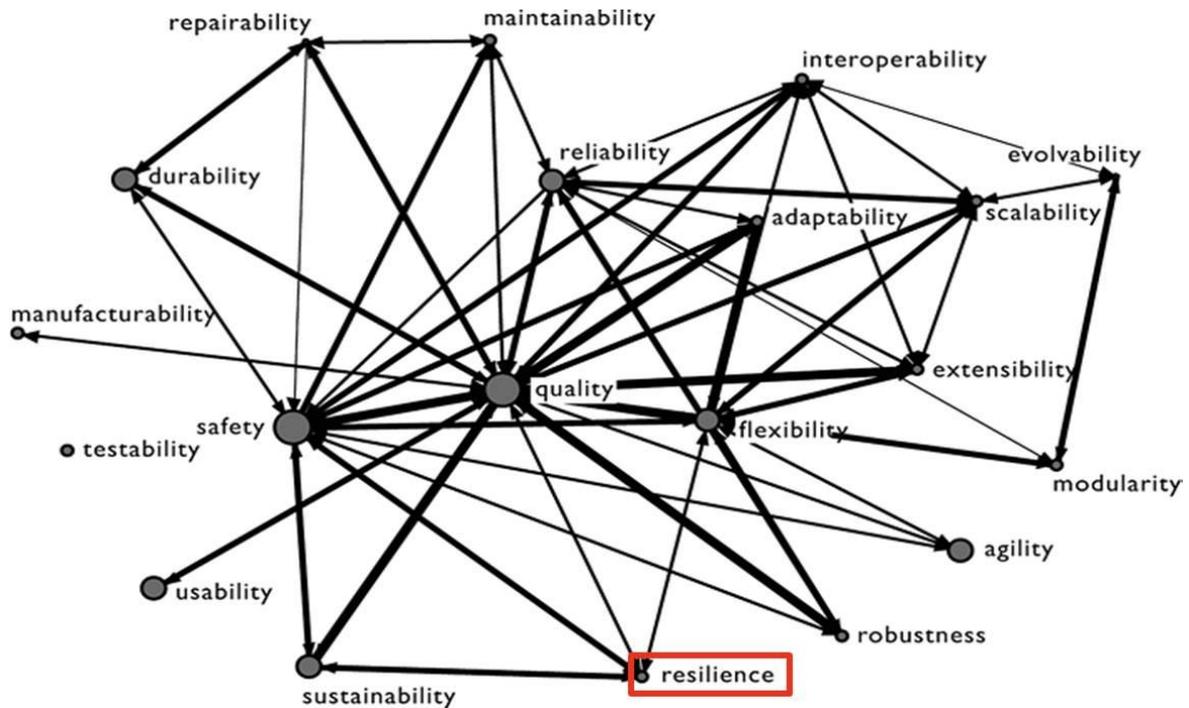


Figure 20. Réseau de corrélation des « ilities » (DeWeck, 2012)

2. Les différents référentiels d'« -ilities » existants dans la littérature pour garantir l'identification précise et quasi-exhaustive des relations de la résilience. En effet, le référentiel d'« -ilities » évolue constamment avec l'identification de nouvelles « -ilities ». Ceci est notamment dû au fait que la complexité des systèmes étant croissante, une plus grande attention est portée aux « -ilities » et cela favorise également leur découverte. De la même manière, si certains auteurs identifient un socle commun d'« -ilities » (ex. agilité, fiabilité), leurs référentiels peut varier sur certaines. C'est ainsi que Willis identifie la vulnérabilité comme une « -ilities » ou que Ross identifie la sécurité sans que ces deux soit partagées par ces deux auteurs. Nous sommes donc conscients qu'il est impossible de garantir la complétude à un instant donné des relations de la résilience cependant, les référentiels disponibles dans la littérature évoluent entre 70 (SPEC innovation) et 90 (Laprie,1992) (Avizienis, 2001) « -ilities » (figure 21). Nous nous appuyons ainsi sur ces travaux et développons par la suite un ensemble de cartographie permettant la prise en compte d'autres « -ilities » si de nouvelles devaient être identifiées dans le futur.



Figure 21. Différents référentiels de « -ilites » (Ross vs. Willis)

En conséquence, à partir des deux points mentionnés, nous établissons :

1. Une **cartographie des relations**. Elle consiste à identifier et à caractériser la relation de la résilience à une autre « -ility » selon des éléments tels que l’existence, ou encore la nature. Cette première cartographie sert de base au développement d’une méthode d’évaluation basée sur l’écosystème d’« -ilites ».
2. Une **cartographie de la dynamique de la résilience**. Cette cartographie doit permettre de gagner en précision en termes d’évaluation, notamment en positionnant les différentes relations identifiées, dans la première cartographie, sur les différentes phases de la dynamique de la résilience (ex. anticipation).

3. Cartographie des relations de la résilience

Cette première cartographie s’appuie sur l’identification et la définition des relations existantes entre la résilience et l’ensemble des « -ilites ». Dans cet objectif nous avons étudié les propriétés, les attributs et le rôle de ces « -ilites » afin d’en définir leur relation.

Premièrement, certaines de ces relations sont clairement identifiées par cooccurrence dans la littérature comme dans DeWeck. Deuxièmement, d’autres relations peuvent être identifiées à partir de leur définition et par la proximité des caractéristiques qui définissent les « -ilites ». C’est le cas par exemple entre la maintenabilité et la réparabilité dans le graphe précédent ou

la relation n'est pas établie mais pour laquelle on peut comprendre que la capacité d'un système à être réparé est liée à sa capacité à être maintenu. Ensuite, si ce lien est identifié, il ne présage en rien de la nature de la relation à savoir si une « -ility » dépend de l'autre ou encore si elle peut se substituer à l'autre. Aussi, il est nécessaire d'identifier également la nature de ce lien. Enfin, il faut également considérer la direction de ce lien c'est-à-dire, dans l'exemple précédent, si la relation est orientée de la réparabilité vers la maintenabilité ou inversement.

En conséquence, nous utilisons trois composantes appliquées à la résilience pour déterminer la cartographie des relations à savoir :

1. L'**existence**. Il s'agit d'identifier si un lien existe entre la résilience et une autre « -ility ».
2. La **nature**. Il s'agit d'identifier les propriétés du lien entre la résilience et l'« -ility » avec laquelle elle est liée.
3. L'**orientation**. Il s'agit de mettre entre évidence si la direction de la relation s'applique de la résilience vers une « -ility » ou inversement.

Notons dès à présent que ces trois composantes ne sont pas dé-corrélées et, bien que présentées indépendamment, sont appliquées par la suite en même temps pour obtenir la cartographie des relations.

3.1. Existence de la relation

L'identification de l'existence d'une relation entre la résilience et d'autres « -ilities » est réalisée à partir d'une analyse bibliographique des différentes « -ilities » et des propriétés qui les caractérisent. A titre d'exemple, DeWeck établit son graphe à partir de l'analyse de la cooccurrence des « -ilities » dans la littérature. En ce qui concerne la résilience, il identifie quatre relations avec la durabilité, la sécurité, la qualité et la flexibilité. Cependant, cela ne signifie pas que la résilience n'a pas d'autres liens avec d'autres « -ilities ». En effet, la non identification d'un lien peut avoir comme origine le fait (1) qu'une exigence est dans sa phase de jeunesse (peu d'études sont réalisées dessus) (DeWeck, 2012) (2) qu'aucune étude de relation n'a été réalisée car aucun lien n'est constaté dans aucuns domaines d'applications ou encore (3) que la relation existe (et qu'elle est identifiée dans la littérature) mais qu'elle n'est pas nécessairement directe dans le graphe (ou pas encore prise en compte dans le graphe).

Ensuite, notre cartographie des relations de la résilience est modélisée en considérant uniquement les liens directs entre les « -ilities » et la résilience. Il s'agit de simplifier le graphe de relations en éliminant tous les liens intermédiaires qui peuvent exister au sein du graphe. Le graphe de (DeWeck, 2012) présente la durabilité en lien avec la sécurité, elle-même en lien avec la résilience. Si un lien est également identifié dans la littérature entre la durabilité et la résilience, le graphe sera transformé pour ne considérer que les liens directs de la sécurité et de la durabilité vers la résilience même si ce lien intermédiaire existe bien.

A titre d'exemple pour le premier cas (jeunesse) nous pouvons mettre en avant l'interopérabilité qui, développée activement depuis le début du 20eme siècle, n'est pas liée à

la résilience dans (DeWeck, 2012). Cependant, l'interopérabilité telle qu'elle est définie dans la littérature (Tolk, 2003) (ISO/IEC, 1994) présente un ensemble de caractéristiques (ex. capacité d'interaction) qui peut être intéressant pour la résilience. C'est le cas notamment dans les systèmes collaboratifs où la capacité de partage et d'échange d'information entre les différents sous-systèmes peut jouer un rôle important dans leur capacité à anticiper un événement, s'adapter ou encore se rétablir. Pour le deuxième cas nous pouvons mentionner la survivabilité où, là encore, la relation avec la résilience n'est pas établie. Pourtant cette capacité « à minimiser l'impact de perturbations de durée finie lors de la livraison de valeur » (Ross, 2011, b) joue un rôle dans la capacité de résilience d'un système et plus précisément dans l'absorption d'un choc. Enfin, certaines « -ilities » comme la manufacturabilité qui se définit comme la capacité de « quelque chose » qui peut être manufacturé (Kerbrat, 2010) n'a pas de lien identifié et ne présente pas dans sa définition de caractéristiques qui la lie à la résilience. Enfin, pour le troisième cas, s'il existe des « -ilities » liées directement avec la résilience et qui ont un rôle essentiel dans son soutien à la résilience, d'autres peuvent également soutenir la résilience sans être identifiés en première intention dans le graphe de DeWeck. Nous choisissons dans nos travaux d'identifier ces cas particuliers et de mettre la résilience directement avec ces « -ilities » en « cassant » éventuellement les liens avec d'autres « -ilities » dites intermédiaires. C'est le cas par exemple sur la résilience, la sécurité et la durabilité. La figure suivante montre un lien direct entre d'une part la sécurité et la résilience et entre la durabilité et la sécurité. Cependant, la littérature (Domptail, 2013) (Chapman, 2009) identifie un lien entre la durabilité et la résilience. Nous simplifierons donc par la suite notre cartographie en établissant une relation directe entre la résilience et les autres « -ilities ».

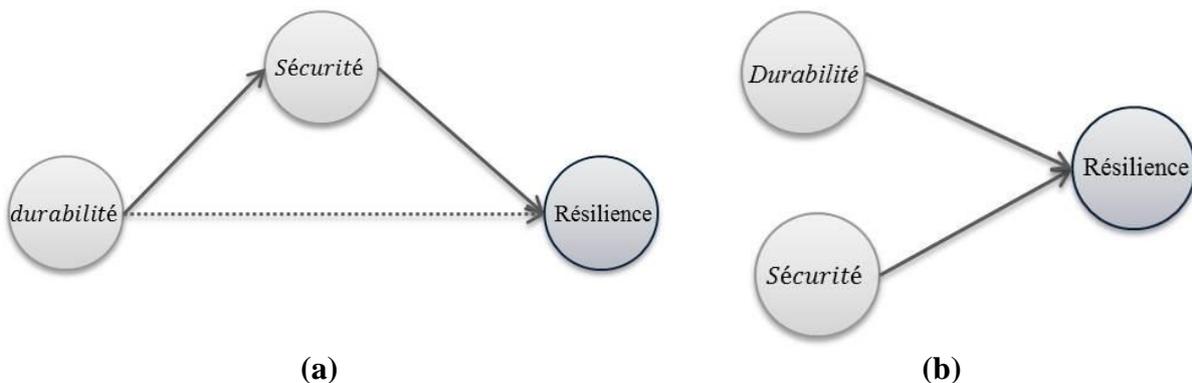


Figure 22. Existence d'« -ility » dans la relation avec la résilience (a) existence indirecte, (b) existence directe

Ainsi, l'objectif est d'identifier l'ensemble des « -ilities » qui présente une caractéristique, une propriété qui la lie aux différentes caractéristiques de la résilience (Tableau 5). A ce stade, nous n'identifions pas la nature de la relation mais simplement l'existence d'un lien qui sera précisé ensuite par sa nature.

Tableau 5. Caractéristiques communes entre la résilience et les « -ilities »

Ility	Définition	Caractéristiques couvertes de la résilience	Lien nouveau lien/existant (DeWeck, 2012)
Résilience	Capacité à résister à un changement ou à un événement perturbateur en réduisant les impacts négatifs initiaux (capacité d'absorption), s'adapter à eux (adaptabilité) et s'en remettre (rétablissement) (Haimès, 2009). <ul style="list-style-type: none"> • Résistance • Anticipation • Prévention • Préparation • Protection • Réponse • Contrôle • Interaction • Echange • Réparation • Modification • Flexibilité • Absorption • Adaptation • Récupération • Rapidité • Réaction • Survie • Assurance • Maintenance • Support • Changement • Transmission • Rétablissement 		
Accessibilité	Degré auquel un produit, un appareil, un service ou un environnement est accessible au plus grand nombre de personnes possible (Litman, 2008)	<ul style="list-style-type: none"> • Résistance • Adaptation 	Nouveau
Agilité	Capacité d'un système à la fois à être flexible et à changer rapidement (Ross, 2015).	<ul style="list-style-type: none"> • Flexibilité • Changement • Rapidité 	Nouveau
Changeabilité	Transition dans le temps d'un système à un état modifié. (Ross, 2008)	<ul style="list-style-type: none"> • Changement • Transmission 	Nouveau
Contrôlabilité	La structure, doit être soigneusement conçue et évaluée pour s'assurer que les contrôles sont adéquats pour maintenir les contraintes de comportement à même de contrôler les risques (Leveson, 2006).	<ul style="list-style-type: none"> • Maintenance • Contrôle 	Nouveau
Disponibilité	Caractéristiques d'un système visant à garantir un niveau de performance opérationnelle convenu, généralement une disponibilité, pour une période supérieure à la normale (Lauby, 2012) (Clouqueur, 2002).	<ul style="list-style-type: none"> • Réponse • Résistance 	Nouveau
Durabilité	Capacité d'un système, prédisposé à un choc, à rebondir et à s'adapter pour survivre en modifiant ses attributs non essentiels et en se reconstruisant (Manyena, 2015).	<ul style="list-style-type: none"> • Réponse • Adaptation • Modification 	Nouveau
Interopérabilité	Capacité des systèmes à interagir à travers l'échange d'informations et	<ul style="list-style-type: none"> • Interaction • Réponse 	Nouveau

	d'autres entités telles que des objets matériels, de l'énergie, et est un support nécessaire pour permettre la collaboration de système (ISO/TC, 2009)	<ul style="list-style-type: none"> • Echange 	
Fiabilité	Capacité à exécuter de manière cohérente la fonction ou la mission prévue ou requise, à la demande et sans dégradation ni défaillance. (David, 2009).	<ul style="list-style-type: none"> • Prévention, • Adaptation • Absorption 	Nouveau
Flexibilité	Capacité du système à se restructurer en réponse à des perturbations de l'environnement (Hollnagel, 2007)	<ul style="list-style-type: none"> • Réponse • Adaptation • Absorption 	Existant
Maintenabilité	Capacité à maintenir ses fonctions et sa structure face aux changements internes et externes et à se dégrader gracieusement lorsqu'il le faut (Allenby, 2005)	<ul style="list-style-type: none"> • Maintenance • Réponse • Rétablissement 	Nouveau
Modifiabilité	Possibilité de modifier l'ensemble actuel des paramètres système spécifiés. (DeWeck, 2012)	<ul style="list-style-type: none"> • Modification • Résistance • Adaptation 	Nouveau
Modularité	Un moyen de parvenir à la flexibilité et à l'évolutivité et de proposer des options pour l'échange de composants système. (Ross, 2008)	<ul style="list-style-type: none"> • Changement • Flexibilité 	Nouveau
Reconfigurabilité	Capacité à changer sa disposition et ses liens de manière réversible (DeWeck, 2012)	<ul style="list-style-type: none"> • Changement • Maintenance • Rétablissement 	Nouveau
Réactivité	Capacité d'un système à réagir (changer) rapidement (DeWeck, 2012).	<ul style="list-style-type: none"> • Changement • Réponse • Rapidité 	Nouveau
Réparabilité	Aptitude d'un produit à être remis en état de fonctionnement, dans des conditions techniques et économiques données, par une intervention nécessitant momentanément son indisponibilité (MilHdbk2165, 1995). Disponibilité des ressources pour limiter les perturbations sur le système défaillant principal et le préparer (Jackson, 2013)	<ul style="list-style-type: none"> • Rétablissement 	Nouveau
Robustesse	Capacité à protéger et à se préparer d'un système face à un danger externe et interne. Aptitude du système à résister à un ensemble prévisible de perturbations	<ul style="list-style-type: none"> • Protection • Résistance • Préparation • Absorption 	Nouveau

	d'ampleur a priori modestes (Luzeaux, 2011). Capacité de s'adapter aux changements de missions et aux exigences. Capacité de fonctionner de manière fiable compte tenu des changements dans les menaces et l'environnement. (Ross, 2008)		
Sécurité	Capacité à assurer le fonctionnement du système en éliminant les dangers, ou en prévenant les événements, et / ou en protégeant contre les résultats. (Hollnagel, 2007)	<ul style="list-style-type: none"> • Prévention • Protection • Résistance 	Existant
Sûreté	Capacité à ne pas subir de dommages potentiels causés par des forces extérieures ou à résister à ces dommages. (Lefebvre, 2009)	<ul style="list-style-type: none"> • Assurance • Résistance 	Nouveau
Stabilité	Maintien de la capacité de réaction aux perturbations. (Lundberg, 2006)	<ul style="list-style-type: none"> • Réaction 	Nouveau
Survivabilité	Capacité d'un système à résister à l'impact d'une perturbation externe sur l'efficacité de la mission (Chin, 2013).	<ul style="list-style-type: none"> • Survie • Résistance 	Nouveau
Sustainable	Capacité qui permet de résister et d'être flexible afin de continuer à fonctionner. (Fiksel, 2003)	<ul style="list-style-type: none"> • Adaptation • Réponse • Maintenance • Flexibilité 	Existant
Testabilité	Caractéristique de conception qui permet d'obtenir le statut (Opérationnel, Dégradé) d'un élément et de réaliser l'isolation de défauts dans l'élément de la façon la plus opportune (Lefebvre, 2009) (MilHdbk 2165, 1995).	<ul style="list-style-type: none"> • Anticipation • Réponse 	Nouveau

3.2. Nature de la relation

Il existe plusieurs types qui caractérisent la nature du lien qui existe entre des « -ilities » à savoir, la compensation, la substitution, le compromis, le conflit et l'influence.

La compensation. Elle est définie comme « *l'action de contrebalancer, d'équilibrer un effet par un autre, neutraliser un inconvénient, un préjudice par un avantage, un dédommagement* » (Larousse, 2009). La compensation est une nature de relation qui permet d'équilibrer l'effet d'une « -ility » par un autre « -ility » (e.g. sustainability et durability).

La substitution. Elle se définit comme une action de remplacer un artefact (« -ility ») par un autre (ou plusieurs) artefact (« -ility »). Selon (Hollnagel, 2007) le principe de substitution exprime les artefacts qui ont des effets neutres et que leur introduction dans un système n'a donc que des conséquences voulues, mais aucune conséquence imprévue. La substitution est basée sur le concept d'interchangeabilité. La substitution permet de remplacer une « -ility »

par une ou plusieurs en respectant les caractéristiques nécessaires de la « -ility » qu'elle remplace (ex. réparabilité et reconfigurabilité).

Le compromis. Il est défini comme un arrangement dans lequel deux ou plusieurs parties (« -ilities ») font des concessions mutuelles dans le but d'arriver à une collaboration, ou en vue d'obtenir une majorité dans un réseau. Selon (Madni, 2009) l'efficacité des compromis est basée sur l'assouplissement d'une contrainte (e.g. sustainabilité et robustesse).

Le conflit. Il est défini comme la constatation d'une opposition entre entités ou des « -ilities ». Dans le réseau d'« -ilities » l'action d'une peut détruire la valeur de l'autre (ex. flexibilité vs. robustesse).

L'influence. Elle est définie comme une « *action, généralement continue, qu'exerce quelque chose sur quelque chose* »⁷. Elle se définit comme la variation d'une « -ility » (cible) résultant de la variation d'une « -ility » (source) avec laquelle elle est en relation. À la fin, « *l'influence est obtenue en mesurant la quantité d'interaction entre deux entités* » (Ouyang, 2009). A titre d'exemple, la robustesse est identifiée comme étant en relation avec la résilience. Une variation (augmentation ou diminution) de la robustesse entraîne une variation de la résilience en conséquence. En effet, la robustesse peut être vue comme une barrière pour la protection et la préparation d'un système à faire face à un événement. Cela signifie qu'en modifiant (augmentation/diminution) la robustesse, la résilience est modifiée (augmentation/diminution) à son tour.

Dans le cadre de l'évaluation de la résilience nous nous intéressons uniquement à la relation d'influence c'est-à-dire que nous ne conservons que ce type de relation dans la cartographie des relations de la résilience.

3.3. Orientation de la relation

La dernière composante de la cartographie des relations caractérise la direction du lien entre les « -ilities ». Cette orientation peut être unidirectionnelle (ex. la résilience influence la qualité) ou bidirectionnelle (ex. la sécurité influence la résilience et inversement). Ainsi, ce concept permet de connaître l'orientation du changement c'est-à-dire, dans le cas de la résilience, l'ensemble des « -ilities » qui sont en relation et qui l'influencent mais aussi celles qui sont influencées par cette dernière (ex. la qualité de service est influencée par la résilience). Dans le cadre de nos travaux nous ne retenons que l'orientation « de « -ility » vers résilience ».

En conséquence, la cartographie des relations issue de l'existence de la nature et de l'orientation doit nous servir de base à la définition d'une méthode d'évaluation de la résilience dans son écosystème d'« -ilities ». Notons enfin, que les trois composantes de construction de la cartographie des relations sont suffisamment génériques pour être appliquées à d'autres « -ilities » en vue du développement d'une méthode d'évaluation propres à leurs caractéristiques et toujours au sein de l'éco système d'« -ilities ».

⁷ Le lien est accessible au 22 juillet 2019 : <https://www.cnrtl.fr/definition/influence>

3.4. Cartographie

En appliquant les trois composantes précédemment définies pour la résilience (relation, nature et orientation), nous obtenons la cartographie finale des relations comme montrée dans la figure 23.

Comme mentionné précédemment, nous ne conservons que la relation d'influence des « -ilities » de l'écosystème sur la résilience ainsi que l'orientation « de « -ility » vers résilience ». C'est la raison pour laquelle certaines « -ility » en relation avec la résilience ne sont pas positionnées sur ce graphe soit parce que l'orientation n'est pas orienté vers la résilience (ex. résilience-qualité) ou encore parce que la relation n'est pas l'influence mais le compromis, la substitution ou encore la compensation (ex. adaptabilité – résilience). Dans le cas où d'autres « -ilities » ou relations seraient découvertes, cette cartographie peut être étendue en respectant le triptyque existence – influence – orientation.

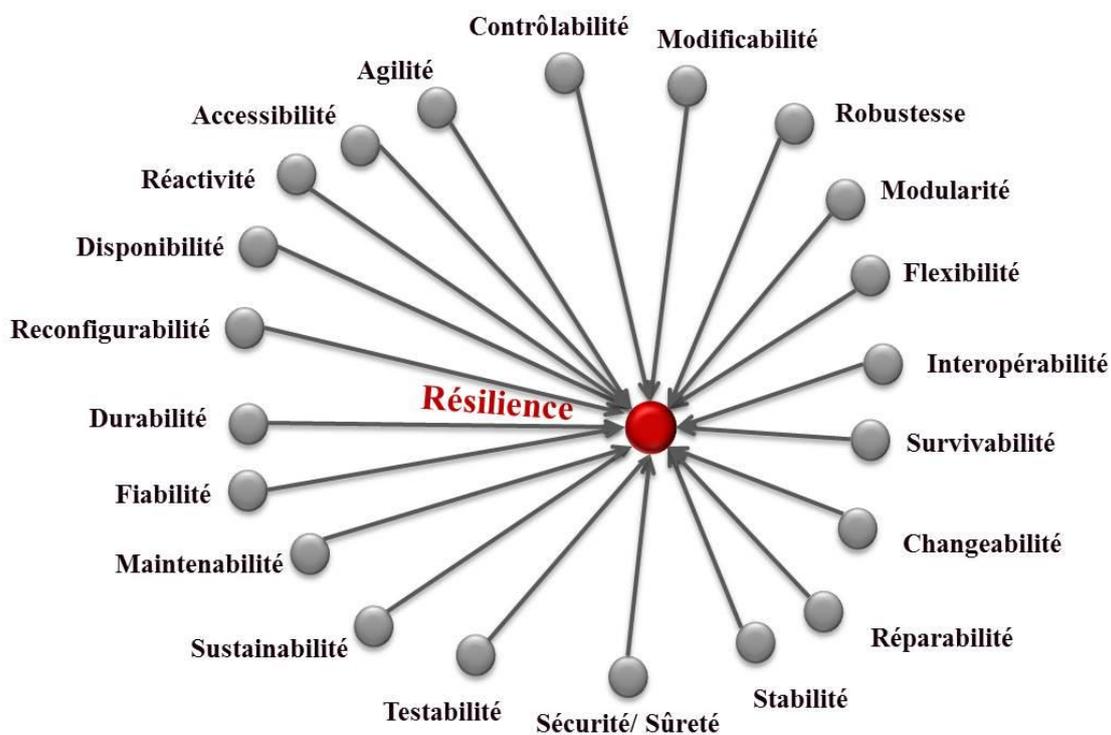


Figure 23. Cartographie des relations (Moradi, 2018a)

4. Cartographie de la dynamique de la résilience

Nous avons établi dans la partie précédente une cartographie qui identifie les « -ilities » en relation avec la résilience. Nous avons également vu, au travers des différentes définitions de la résilience, qu'elle était caractérisée par 3 zones à savoir l'anticipation (prévention et préparation), la réponse (absorption et adaptation) et le rétablissement (figure 24).

Bien que l'ensemble des « -ilities » identifié influence la résilience, nous choisissons de les positionner selon la dynamique de la résilience pour gagner en précision pour son évaluation.

En effet, nous postulons que certaines « -ilities » n'influencent pas la résilience de la même manière au cours de son cycle. Certaines peuvent être sollicitées par une seule zone quand d'autres vont intervenir sur plusieurs zones avec des niveaux d'influence différents. C'est le cas par exemple de la sécurité qui est sollicitée dans la zone d'anticipation et qui ne l'est plus dans la zone de rétablissement. En effet, la sécurité est une capacité compatible de par ses caractéristiques avec la zone d'anticipation et qui permet de fournir des services afin d'aider à anticiper un événement. En revanche, elle n'est pas compatible avec le rétablissement pour lequel elle n'apporte pas de caractéristiques qui soutiennent sa réalisation. Ainsi, en établissant cette cartographie de la dynamique de la résilience qui précise la précédente, l'évaluation peut être effectuée de manière locale (par zone) permettant ainsi d'obtenir des informations précises sur le niveau de résilience et les éventuelles actions à mettre en œuvre pour l'améliorer. Dans ce sens, l'évaluation de résilience selon chaque zone permet d'obtenir une valeur de résilience précise et optimale afin de l'améliorer.

En procédant selon la même démarche que pour la cartographie des relations, nous analysons les différentes définitions proposées dans la littérature afin de positionner les « -ilities » sur les phases de la dynamique de la résilience. Là encore, il s'agit d'identifier les caractéristiques intrinsèques de chaque « -ilities » qui présentent un intérêt pour une phase particulière (ou plusieurs) de la résilience. Dans les parties suivantes, nous précisons dans un premier temps les attentes des différentes phases de la dynamique de la résilience au-delà des mots clés de chaque zone (ex. zone 1 – anticipation). Nous établissons ainsi la manière dont une « -ility » peut supporter l'efficacité d'une zone considérée. Nous réalisons ensuite le lien entre les « -ilities » avec les différentes zones pour aboutir à la proposition d'une cartographie de la dynamique.

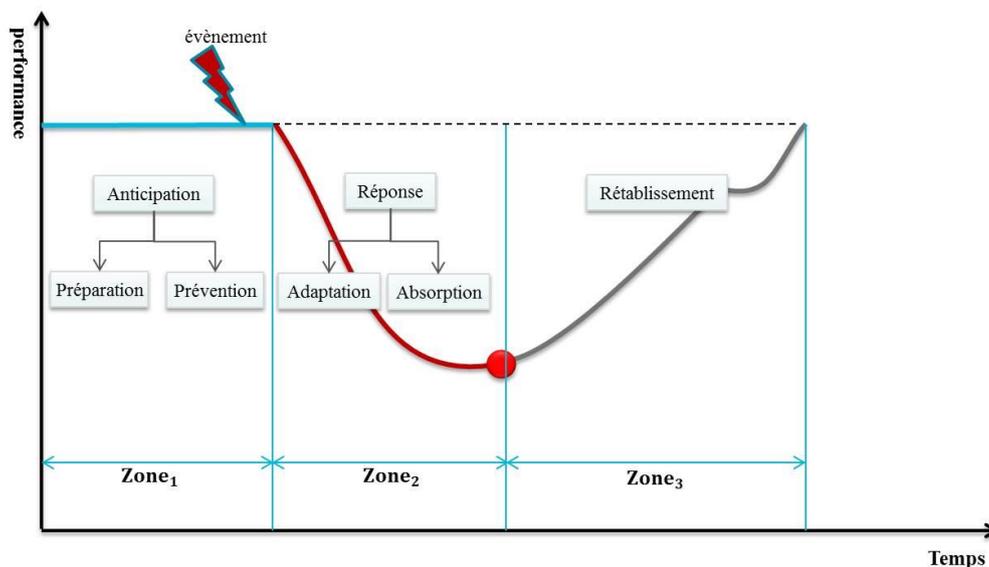


Figure 24. Dynamique de la résilience via trois zones (Anticipation, Réponse, Rétablissement)

4.1. Zone d'anticipation : capacités attendues et exemples de positionnement

L'anticipation consiste à gérer les risques (Eydieux, 2018). Selon (Sheard, 2008) l'anticipation est une capacité de contrôle par un esprit central ; des efforts sont déployés pour prévoir et prévenir les dangers potentiels avant que des dommages ne soient causés.

Il s'agit dans cette zone d'analyser les risques, d'établir des règles et des normes et de les mettre en œuvre. L'anticipation inclut deux capacités principales à savoir : la **prévention** et la **préparation**.

Ainsi, l'objectif de la zone d'anticipation est de préparer un système contre les événements perturbateurs les plus probables et les plus prévisibles et de le rendre plus **résilient** en mettant en œuvre différentes techniques. Dans le cadre de nos travaux d'évaluation de la résilience, il s'agit d'identifier l'ensemble des « -ilites » qui vont participer - de par les capacités qu'elles vont mettre en œuvre - à la prévention et la préparation à un événement. L'objet de cette identification est donc bien d'augmenter, améliorer, optimiser, la résilience en termes d'anticipation sur la base de toutes les « -ilites » qui supportent cette activité. Il s'agit donc de permettre à un système de poursuivre sa mission à un niveau de performance initiale et ce même s'il fait face à des événements perturbateurs. La figure suivante présente le principe d'évolution possible de la performance d'un système suivant l'occurrence d'un événement perturbateur et en fonction des « -ilites » sollicitées ou non. Dans la partie gauche (a) les « -ilites » participant à l'anticipation ne sont pas ou peu développées. Dans ce cas, l'apparition d'un événement peut conduire au passage direct dans la seconde zone de la résilience (réponse) avec une perte de performance. Dans la partie droite (b) les capacités des « -ilites » pour l'anticipation sont développées. Dans ce cas, le système peut faire face à un ensemble d'événements perturbateurs connus et permettre au système de poursuivre sa mission au niveau de performance initiale. Il peut également faire face à des événements non connus pendant un temps limité avant de basculer dans la zone de réponse.

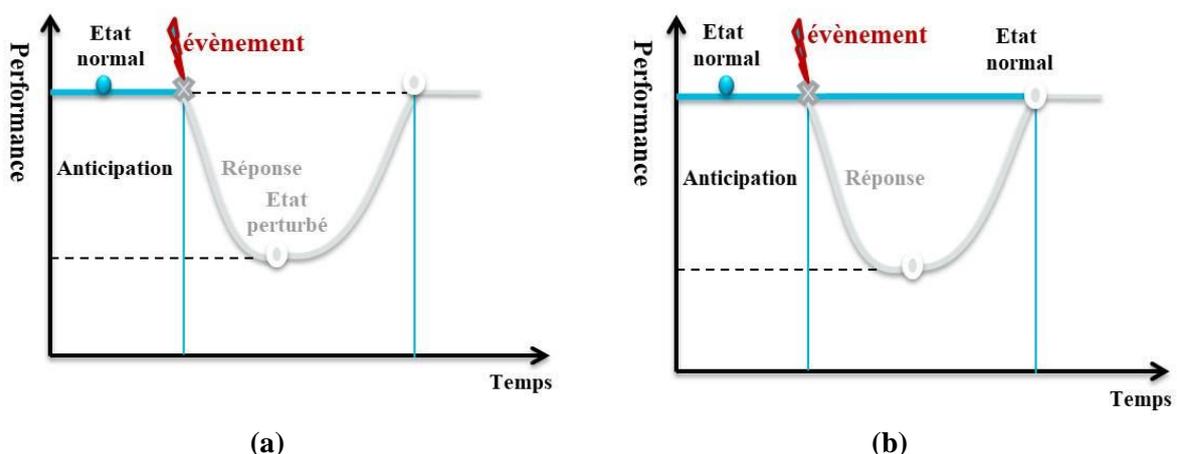


Figure 25. Zone d'anticipation : (a) sans les capacités fournies par les « -ilites », (b) avec les capacités fournies par les « -ilites »

A titre d'exemple, la robustesse est définie comme la « *force du système pour résister aux perturbations* » (Nan, 2017). Elle est définie comme une capacité de rester insensible au

changement de paramètres malgré les changements externes (Ross, 2007). Elle représente donc la capacité d'un système à maintenir son niveau et un ensemble de paramètres spécifiés dans le contexte du changement des forces externes et internes du système. En d'autres termes, il s'agit pour « *le système de continuer à fonctionner correctement dans un large éventail de conditions opérationnelles* » et « *de réaliser ses missions dans des environnements incertains ou changeants* » (Gribble, 2001) (McManus, 2005). Ainsi, les capacités offertes par la robustesse (force du système, stabilité de performance, solidité, résistance) vont permettre à un système de faire face à des dommages et des risques et la positionne donc sur la zone d'anticipation et concerne de manière plus précise les aspects de préparation. Un niveau trop faible de robustesse ne permet pas au système de faire face et de poursuivre sa mission avec un niveau de performance nominal. En revanche, un niveau adéquat permet au système de prévenir un ensemble d'événements identifiés à risque sans conséquences pour les performances du système et dans certains cas des événements non identifiés auxquels il pourra faire face pendant un temps limité.

Il est à noter dès à présent que les différentes définitions de la robustesse mettent en avant un ensemble de capacités qui couvre d'autres phases de la résilience. Ainsi elle doit également permettre « d'absorber le changement » (Yassine, 2007) montrant ainsi qu'au-delà de la phase d'anticipation elle peut être impliquée dans la zone de réponse. Ainsi, elle permet également au système de s'adapter lorsque que ce dernier subit des pertes de performances suite à un événement. Elle fait donc partie de ces « -ilities » que nous avons introduits précédemment et dont l'ensemble des capacités joue un rôle plus ou moins important dans différentes phases de la dynamique de la résilience.

Un autre exemple d'« -ility » jouant un rôle primordial dans la phase d'anticipation est la sécurité. La sécurité peut être assurée en éliminant les dangers, en empêchant le déclenchement d'événements. La sécurité est basée sur différentes caractéristiques de barrières (physiques, fonctionnelles) et de leurs avantages et inconvénients. Il est entendu que les barrières sont certes nécessaires, mais qu'elles représentent essentiellement une approche réactive, insuffisante en soi pour garantir la sécurité (Hollnagel, 2007), *i.e.*, une réponse à une perturbation. Dans le cadre de l'anticipation, on s'intéresse principalement aux différentes stratégies de sécurité relatives à la définition des risques et de leur gestion que ceux-ci soient prévus ou imprévus. Il s'agit d'une part d'identifier le risque si cela est possible car les acteurs ne sont pas toujours en mesure de le faire puisqu'ils peuvent avoir des informations incertaines et, d'autre part, éliminer ce risque si cela est également possible sans gêner ni modifier le fonctionnement du système. Ainsi la sécurité participe à l'anticipation pour la prévention et également la préparation dans le but d'éviter qu'un événement se concrétise et fasse perdre des performances au système, l'emmenant à basculer dans la zone de réponse.

Là encore, la sécurité fait partie des « -ilities » qui couvrent plusieurs phases de la dynamique de la résilience car les barrières mise en œuvre dans cette première zone peuvent participer - dans une moindre mesure - à l'atténuation des conséquences lors de la réponse. Le Tableau 6 présente les « -ilities » qui sont positionnées dans la zone d'anticipation de la résilience.

Tableau 6. « -ilities » positionnées sur la zone d'anticipation de la résilience

Anticipation : « éviter l'événement, qui repose sur la capacité d'anticipation »	Capacités attendues des « -ilities »	
Préparation : « Action de préparation à faire face »	<ul style="list-style-type: none"> • Accessibilité • Disponibilité • Interopérabilité • Fiabilité 	<ul style="list-style-type: none"> • Modificabilité • Robustesse • Sécurité • Testabilité
Prévention : « Action d'éviter les inconvénients, identification et minimisation des risques »	<ul style="list-style-type: none"> • Changeabilité • Contrôlabilité • Disponibilité • Interopérabilité 	<ul style="list-style-type: none"> • Fiabilité • Modificabilité • Sécurité • Testabilité

4.2. Zone de réponse : capacités attendues et exemples de positionnement

L'activité de réponse est réalisée lorsqu'un événement perturbateur ne peut plus être géré par le système et que ses performances commencent à diminuer. Cette activité doit offrir au système la capacité à réduire, minimiser et s'adapter en vue de limiter la perte de performance. La réponse se distingue par deux zones à savoir **l'absorption** et **l'adaptation**.

En conséquence, l'objectif de la zone de réponse est de mettre en œuvre les différents moyens à disposition pour permettre à un système d'une part, de diminuer les conséquences d'un événement sur ses performances et, d'autre part, de s'adapter parce que l'absorption n'est plus ou peu efficace suite à une augmentation de l'intensité ou encore suite à l'occurrence d'un sur événement. Les activités mises en œuvre sans la zone de réponse se poursuivront alors jusqu'à la stabilisation des performances du système et son entrée dans la zone de rétablissement. Il s'agit donc dans cette zone d'identifier l'ensemble des « -ilities » qui participe à la phase d'absorption ainsi qu'à la phase d'adaptation.

La figure suivante présente le principe d'évolution possible de la performance d'un système suite à l'occurrence d'un événement perturbateur et en fonction des « -ilities » sollicitées ou non. Dans la partie gauche (a) les « -ilities » qui contribuent à l'absorption ne permettent pas à leur niveau de développement actuel de stopper la perte de performance du système. Le système continue alors de perdre ses performances au-delà d'une limite définie et acceptable sans être capable de s'adapter. Il peut atteindre un niveau critique de telle manière que toutes les actions mises en œuvre n'ont pas d'effets suffisants pour rétablir le système et, à terme, atteindre l'arrêt du service. Dans la partie droite (b), deux cas se présentent. Dans le premier cas (1), les « -ilities » contribuent efficacement à la diminution des conséquences (absorption) jusqu'à stopper la perte de performance comme envisagé et basculer dans la zone de rétablissement. Dans le deuxième cas (2), le système absorbe efficacement l'événement cependant l'intensité de ce dernier augmente au-delà de la capacité d'absorption ou un autre événement impacte le système. Le système continue de perdre des performances, mais les « -ilities » participant à l'adaptation permettent de déployer des mécanismes stoppant la perte de performance et de basculer dans la zone de rétablissement.

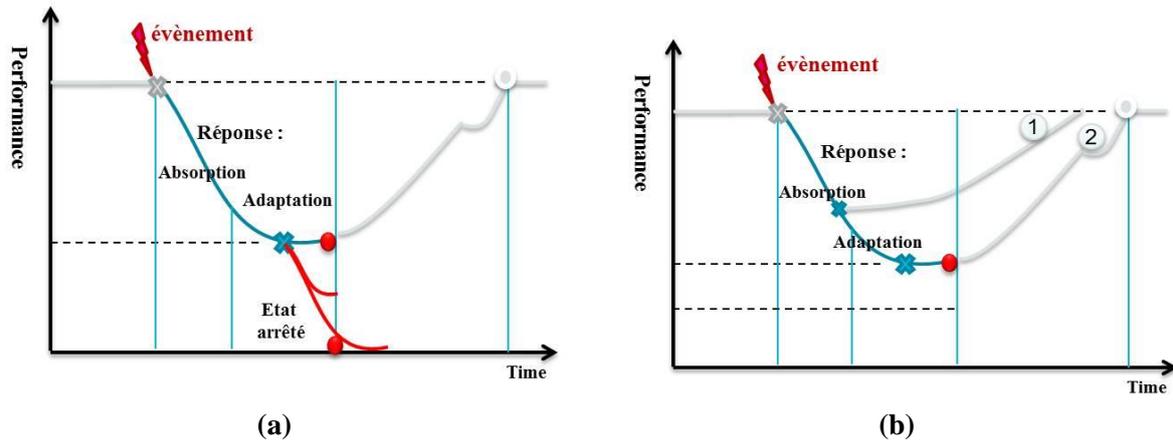


Figure 26. Zone de réponse : (a) sans les capacités fournies par les « -ilities », (b) avec les capacités fournies par les « -ilities »

A titre d'exemple, la flexibilité est définie comme « *la capacité d'un système de maintenir un niveau de performance élevé lorsque les conditions de fonctionnement ou les besoins changent de manière prévisible ou imprévisible* (Olewnik, 2004) ». Il s'agit donc pour un système « *de modifier ses états à savoir les ensembles de capacités avec les conditions de fonctionnement* » (Bordoloi, 1999). Selon (Fricke, 2005), la flexibilité caractérise la capacité d'un système à changer facilement. Des changements externes doivent être mis en œuvre pour faire face à des environnements changeants. Le système dispose donc de la capacité de modifier ses états lorsque sa structure est modifiée pour fonctionner dans une nouvelle situation et ainsi se conformer à son travail de base ou à des missions qui ne sont pas nécessairement inclus dans la définition des besoins du système et ce dans des environnements perturbés ou changeants. De ce fait, la flexibilité supporte le système dans son adaptation face à des évènements dont l'intensité peut évoluer ou à d'autres évènements qui peuvent survenir pendant la phase de réponse en vue d'établir une autre stratégie ou un processus de réponse adapté à un nouveau contexte. La flexibilité est donc une possibilité de satisfaire à la capacité de réponse.

Le tableau 7 présente les « -ilities » qui sont positionnées dans la zone de réponse.

Tableau 7. « -ilities » positionnées sur la zone de réponse de la résilience

Réponse : « absorption et adaptation à l'évènement »	Capacités attendues des « -ilities »
Absorption: « Réduction et minimisation des conséquences »	<ul style="list-style-type: none"> • Agilité • Durabilité • Interopérabilité • Flexibilité • Fiabilité • Réactivité • Robustesse • Survivabilité • Sustainability • Testabilité
Adaptation : « Adaptation aux événements perturbateurs »	<ul style="list-style-type: none"> • Accessibilité • Agilité • Changeabilité • Contrôlabilité • Disponibilité • Durabilité • Interopérabilité • Fiabilité • Flexibilité • Maintenabilité • Modificabilité • Modularité • Réactivité • Robustesse • Stabilité • Survivabilité • Sustainability • Testabilité

4.3. Zone de rétablissement : capacités attendues et exemples de positionnement

Le rétablissement est défini comme la capacité de *retour à un état acceptable ou normal*. Cette faculté de restauration fait référence à la « *capacité pour un système à être rapidement réparé et à revenir - dans la mesure du possible - dans un mode de fonctionnement normal et fiable qui répond aux exigences d'un niveau de qualité de service acceptable et souhaitable* » (Nan, 2017).

En d'autres termes, l'objectif est de restaurer les performances d'un système après l'occurrence d'un évènement et après l'absorption (et l'adaptation possible) de ce dernier. Cette étape intervient donc après que les performances sont stabilisées et que la mise en œuvre des actions pour rétablir son fonctionnement et ses performances à un niveau acceptable est possible.

La figure suivante présente deux cas d'évolution possible du rétablissement en sortie de phase de réponse. Dans la partie gauche (a), les « -ilities » supportant le rétablissement ne sont pas suffisamment développées pour permettre au système de retrouver un niveau de performance défini comme acceptable. La qualité de service résultante n'est pas acceptable pour les parties prenantes utilisatrices du système pouvant conduire à l'interruption définitive de service ou dans l'attente de revenir à un niveau de performance acceptable. Dans la partie droite (b), deux cas de rétablissement se présentent. Dans le premier, le système est à même de revenir à un état de fonctionnement et de performance acceptable. Il maintient une qualité de service acceptable pour les parties prenantes utilisatrices.

Le rétablissement total sera planifié ultérieurement (ex. période de maintenance, arrêt de service saisonnier...). Dans le second cas le système revient à un état de fonctionnement et de performance nominal (éventuellement par paliers) sans autre incidence.

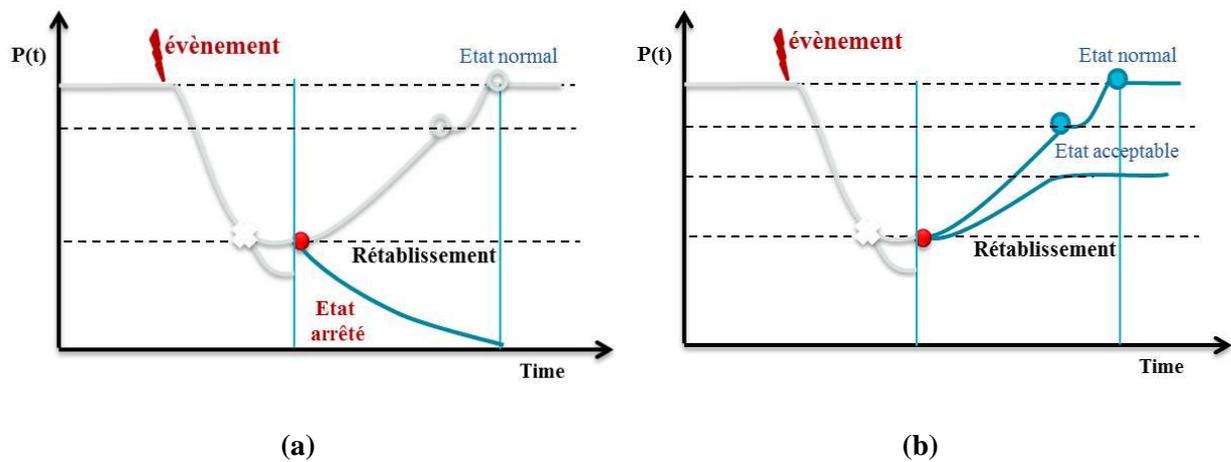


Figure 27. Zone de rétablissement : (a) sans les capacités fournies par les « -ilities », (b) avec les capacités fournies par les « -ilities »

A titre d'exemple la reconfiguration est une « *capacité à changer sa disposition et ses liens de manière réversible* » (DeWeck, 2012). Cette capacité se caractérise par la possibilité (1) d'ajouter, (2) de supprimer et/ou de réorganiser et (3) de connecter des composants pour améliorer rapidement et efficacement le rapport coût/efficacité des composants et des fonctions d'un système pouvant donner lieu à un ensemble souhaité de configuration alternatives (Farid, 2007).

La reconfiguration du système est décrite en termes de fonctions, de composants et de leurs interrelations. Deux types de relations peuvent être étudiées à savoir les relations fonctions-composants et relations composants-composants. Ainsi, la capacité de reconfiguration selon les aspects fonctions-composants s'inscrit dans la zone de rétablissement permettant au système de revenir à son niveau de performance initiale ou encore à un niveau défini par les parties prenantes comme acceptable en termes de qualité de service et de performance.

Un autre exemple d'« -ility » participant au rétablissement est la « *changeabilité* ». Cette capacité offre la possibilité de changement c'est-à-dire « *le potentiel de mise en œuvre, au besoin, de changements organisationnels et techniques en utilisant les capacités de flexibilité fournis* » (Heinen, 2008). Les objectifs de la changeabilité pour un système sont donc d'être :

- Capable de s'adapter aux changements de missions et exigences ;
- Capable de fonctionner de manière fiable compte tenu de l'évolution des menaces et de l'environnement ;
- Durablement efficace / facilement accessible sur son cycle de la vie ;
- Développé avec des produits conçus pour être utilisés sur diverses plateformes / systèmes ;
- Facilement modifiable pour tirer parti des nouvelles technologies et fonctionnalités associées ;

- Capable de maintenir la livraison de valeur tout au long du cycle de vie d'un système, malgré les changements de contextes (Ross, 2008) ;
- Capable de modifier sa forme et par conséquent sa fonction, à un niveau de dépense en ressources acceptable (Ross, 2008).

Ainsi, cette capacité doit permettre à un système ayant subi des dommages conduisant à des pertes de performances de pouvoir changer (au sens de remplacement) soit son organisation soit un sous-système/composant pour pouvoir fournir à nouveau - et dans un temps limité - un service à un niveau de qualité défini comme acceptable.

Le tableau 8 présente les « -ilities » qui sont positionnées dans la zone de rétablissement.

Tableau 8. « -ilities » positionnées sur la zone de rétablissement de la résilience

Rétablissement	Capacités attendues des « -ilities »
« Retour à un état qualifié d'acceptable »	<ul style="list-style-type: none"> • Agilité • Changeabilité • Contrôlabilité • Disponibilité • Interopérabilité • Fiabilité • Maintenabilité • Modificabilité • Réactivité • Reconfigurabilité • Réparabilité • Stabilité • Testabilité

4.4. Cartographie

La cartographie de la dynamique repose sur le positionnement des « -ilities » identifiées dans la cartographie des relations sur la dynamique de la résilience. Selon les capacités développées par chaque « -ilities » et celles attendues dans les différentes phases, les « -ilities » couvrent plus ou moins d'aspects de la résilience. Elles participent de par leur influence qu'elles ont sur la résilience à sa réalisation, que cette participation soit bénéfique ou non si elles ne sont pas développées suffisamment.

En analysant l'ensemble des « -ilities » appartenant à la cartographie des relations au travers de leurs capacités produites et les capacités requises par la résilience dans chacune de ses phases, nous obtenons le positionnement comme présenté dans le tableau suivant. Ce tableau présente l'ensemble des références bibliographiques disponibles dans la littérature mentionnant le positionnement obtenu.

Tableau 9. Positionnements de « -ilites » sur la dynamique de la résilience

Dynamique de la résilience		
Anticipation	Réponse	Rétablissement
Accessibilité		
(Leone, 2013), (Reggiani, 2011).	(Reggiani, 2011), (Leone, 2013)	X
Agilité		
X	(Ross, 2015), (Alberts, 2007)	(Cox, 2011), (Ross, 2015), (Wahl, 2013)
Changeabilité		
(Ross, 2015)	(Ross, 2015)	(Ross, 2015)
Contrôlabilité		
(Leveson, 2006) (Dinh, 2012)	(Leveson, 2006), (Luzeaux, 2011) (Dinh, 2012)	(Leveson, 2006) (Skogestad, 1996)
Disponibilité		
(Lauby, 2012), (Lefebvre, 2009)	(Lauby, 2012), (Lefebvre, 2009).	(Lauby, 2012), (Lefebvre, 2009), (Clouqueur, 2002)
Durabilité		
X	(Allen, 2001).	X
Interopérabilité		
(ISO/TC, 2009)	(ISO/TC, 2009)	(ISO/TC, 2009)
Fiabilité		
(David, 2009) (Zio, 2016)	(David, 2009) (Zio, 2016)	(LaRocca, 2014)
Flexibilité		
X	(DeWeck, 2012) (Fricke, 2005) (Olewnik, 2004) (Holling, 2001)	X

Maintenabilité		
X	(Allenby, 2005) (Nogal, 2016)	(Allenby, 2005) (Nan, 2017)
Modificabilité		
(DeWeck, 2012) (Ross, 2007)	(DeWeck, 2012) (Ross, 2007)	(Ross, 2015)
Modularité		
X	(Fricke, 2005) (Ross, 2007)	X
Reconfigurabilité		
X	X	(DeWeck, 2012)
Réactivité		
X	(Ross, 2014)	(Ross, 2014)
Réparabilité		
X	X	(Jackson, 2013)
Robustesse		
(Luzeaux, 2011) (Ross, 2008)	(Luzeaux, 2011) (Ross, 2008)	X
Sécurité		
(Hollnagel, 2007) (Lefebvre, 2009)	X	X
Stabilité		
X	(Lundberg, 2006)	(Lundberg, 2006)
Survivabilité		
X	(Chin, 2013) (Ross, 2011, a)	X
Sustainability		
X	(Fiksel, 2003) (Chin, 2013)	X
Testabilité		
(Lefebvre, 2009)	(Lefebvre, 2009)	(Lefebvre, 2009)

A partir de ces positionnements, nous obtenons la cartographie de la dynamique de la résilience selon sa décomposition pour chaque zone comme présenté dans la figure suivante. On peut observer que différentes « -ilites » participent à différentes phases de la résilience.

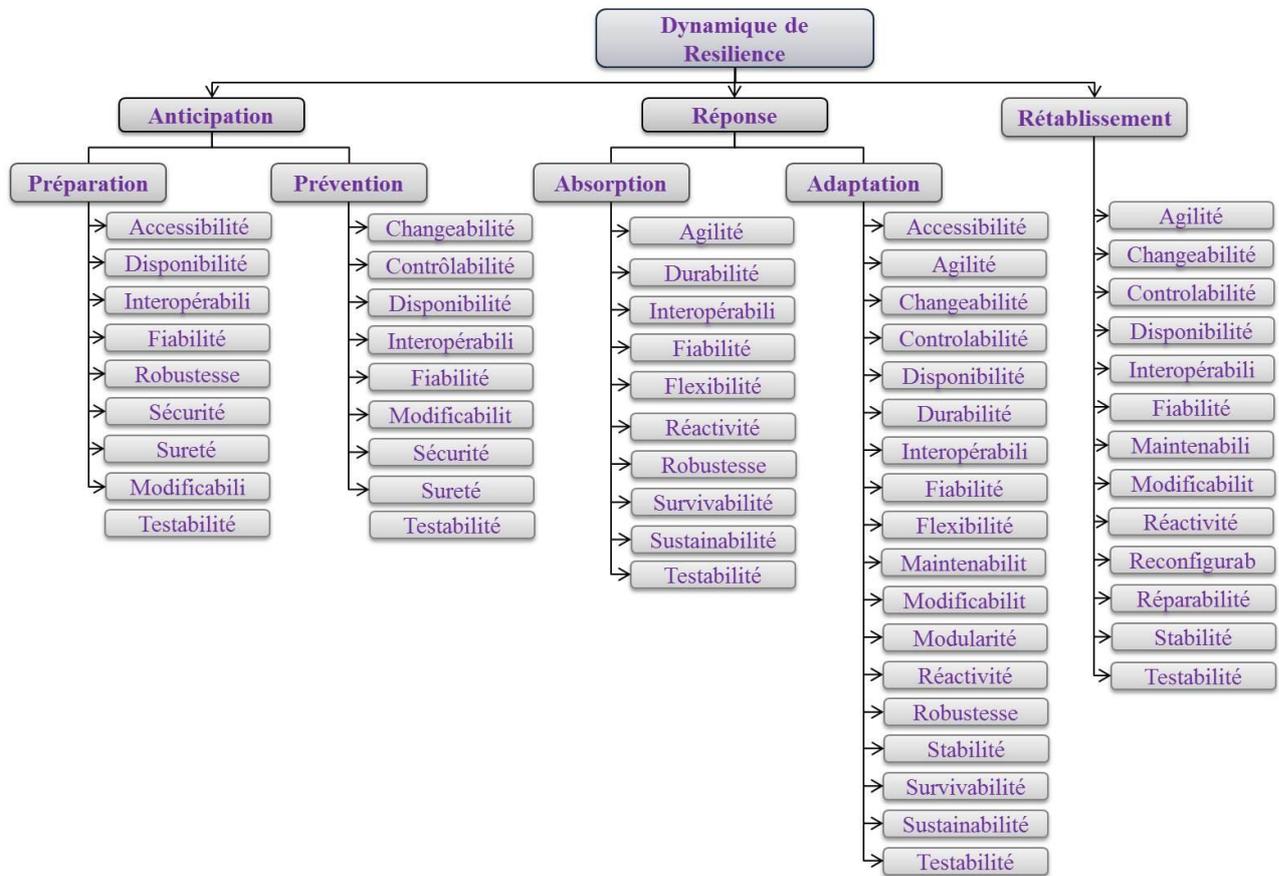


Figure 28. Cartographie de la dynamique de la résilience (Moradi, 2018b)

C’est sur la base de cette cartographie de la dynamique de la résilience que nous développons par la suite notre modèle d’évaluation. Ainsi, celui-ci doit nous permettre d’évaluer la résilience précisément pour chaque zone pour développer des solutions efficaces si cela s’avère nécessaire (défaut constaté sur une zone particulière).

5. Conclusion

Ce chapitre a mis en avant la nécessité de disposer de cartographies de la résilience dans le but de développer une méthode basée sur son analyse au sein du réseau d’« -ilites ». A partir d’une analyse bibliographique sur la base des premiers travaux sur les réseaux d’« -ilites », nous avons développé une première cartographie des relations afin d’observer les « -ilites » dans l’environnement de la résilience. Ainsi, cette cartographie s’appuie sur les principes d’existence de la relation, de la nature de la relation – dans notre cas l’influence – et, enfin, de l’orientation. Cependant, si cette première cartographie pose les bases d’une future évaluation basée sur l’écosystème d’« -ilites », elle peut être développée plus en avant sur la base du cycle de vie de la résilience. Ainsi, en procédant à une analyse plus fine des attributs de chaque « -ility » et des attentes précises de la résilience, nous avons proposé une cartographie

de la dynamique de la résilience. Cette cartographie s'appuie sur les différentes phases de la résilience à savoir l'anticipation (préparation et prévention) la réponse (absorption et adaptation) et le rétablissement. Cette décomposition a pour but de gagner en précision pour l'évaluation. Nous pouvons noter que bien que la première cartographie soit suffisamment générique pour être appliquée à d'autres « -ilites », la seconde est spécifique à la résilience. Cependant les deux restes extensibles dans le cas où d'autres « -ilites » seraient élicitées et en relation avec la résilience.

Les cartographies nous permettent dans le chapitre suivant d'établir les indicateurs de résilience associés à ces « -ilites » et pour chaque zone de la dynamique de la résilience.

Chapitre 4

Evaluation de la résilience

Résumé

Ce chapitre présente les concepts pour formaliser et évaluer la résilience sur la base des cartographies identifiées et définies dans le chapitre précédent. L'objectif de la méthode d'évaluation est d'obtenir un indicateur de résilience basé sur ses relations avec d'autres « - ilities » et qui renseigne sur son niveau de satisfaction. Par la suite, nous nommons cet indicateur « opérabilité » et nous définissons un ensemble de paramètres pour assurer son évaluation sur les trois zones de résilience (anticipation, réponse et rétablissement). Enfin, nous interprétons l'opérabilité en nous appuyant sur la courbe établissant le lien entre la résilience et les performances d'un système.

Table des matières du chapitre 4

1. Introduction	79
2. Motivation et démarche de développement	79
3. Evaluation de la résilience	81
3.1. Généralités sur le modèle d'évaluation	81
3.2 Paramètres	82
3.2.1. L'état courant (γ)	82
3.2.2. L'impact (ω)	84
3.2.3. La priorité (\triangleright)	84
3.2.4. L'existence (σ)	86
3.2.5. L'opérabilité (φ)	87
3.3. Hypothèses	88
3.4. Modèle d'évaluation	89
3.4.1 Evaluation de l'opérabilité d'une source sur la résilience	89
3.4.2 Evaluation de l'opérabilité de plusieurs sources sur la cible.....	90
3.4.2.1 Evaluation au sein d'un groupe (ex. $i_{s1} \triangleright i_{s2}$)	91
3.4.2.2 Evaluation entre deux groupes (ex. $i_{G1} \triangleright^H i_{G2}$ ou $i_{G1} \triangleright^L i_{G2}$)	92
3.4.2.3 Evaluation de l'opérabilité entre les trois groupes de priorité .	94
4. Modèles d'interprétation de l'évaluation	95
4.1. Interprétation de l'opérabilité dans la zone d'anticipation	96
4.2. Interprétation de l'opérabilité dans la zone de réponse	98
4.3 Interprétation de l'opérabilité dans la zone de rétablissement	100
5. Calcul de l'opérabilité globale finale	102
6. Conclusion	103

1. Introduction

Nos travaux portant sur l'évaluation de la résilience, les précédents chapitres ont mis en évidence l'existence de différentes méthodes pour évaluer la résilience. Elle peut être évaluée en mesurant son impact sur la performance et la qualité de service ante- et post- événement, la perte de fonctionnalités ou encore l'efficacité de barrières de sécurité. Nous avons également montré que la résilience appartient à un réseau d'exigences non fonctionnelles (les « -ilities ») qui met en évidence l'existence de relations entre elles (influence, compensation, substitution). L'hypothèse de nos travaux est qu'un modèle d'évaluation peut être développé en s'appuyant sur l'analyse de ce réseau et des relations existantes de la résilience avec les autres exigences. Nous avons donc proposé une cartographie des relations de la résilience incluant l'ensemble de ses relations ainsi qu'une cartographie de la dynamique de la résilience précisant ces relations selon les zones d'anticipation, de réponse et de rétablissement. C'est sur la base de ces deux cartographies que nous développons notre modèle d'évaluation dans les parties suivantes.

Après avoir présenté les motivations pour le développement de notre modèle d'évaluation dans la section 2, nous présentons notre modèle d'évaluation de la résilience et l'ensemble de ses paramètres en section 3. La section 4 présente l'interprétation des résultats issus de l'évaluation pour guider des décideurs au regard du niveau de résilience atteint sur ses différentes zones.

2. Motivation et démarche de développement

Il existe actuellement de nombreuses méthodes pour résoudre le problème de formalisation et d'évaluation de la résilience. Les indicateurs associés à ces méthodes sont de trois types (Gargiulo, 2016) :

- Les paramètres d'attributs qui reposent généralement sur des évaluations subjectives ;
- Les indicateurs construits sur les valeurs des caractéristiques systèmes qui contribuent à la résilience ;
- Les méthodes basées sur la performance qui mesurent les conséquences des perturbations du système et l'impact que les attributs du système ont sur l'atténuation des conséquences.

Si l'ensemble de ses travaux permet une évaluation de la résilience aucun ne se concentre sur une évaluation basée sur les relations de la résilience avec d'autres exigences non fonctionnelles. Elle est dans ce cas étudiée de manière isolée sans tenir compte des aspects par lesquels elle peut être influencée. Notre problématique se concentre sur un modèle d'évaluation s'appuyant sur l'analyse des cartographies des relations et de la dynamique de la résilience, précédemment développées.

A titre d'exemple, la robustesse est liée et influence la résilience. Ainsi, une variation de la robustesse peut faire varier le niveau de résilience du système considéré. Il s'agit donc ici de définir, spécifier ces différents liens et influences en vue d'évaluer la résilience.

Nous faisons ici le choix de développer une approche qualitative. En effet, un système complexe peut être modélisé selon différents points de vue, avec différents langages de modélisation manipulant eux-mêmes des données hétérogènes (qualitative, quantitative, etc.). Cela entraîne un facteur de complexité notamment lorsque que l'on veut manipuler ensemble ces différents aspects en vue d'une analyse. C'est particulièrement le cas pour l'approche que nous développons et où les « -ilities » peuvent concerner différents aspects du système et s'exprimer dans différents domaines de mesure. En ce sens, l'approche qualitative permet d'établir une échelle sur laquelle nous pouvons harmoniser les différents types de données pour réaliser une mesure. L'approche qualitative implique la collecte, l'analyse et l'interprétation de données difficilement réductibles en chiffres. Ces données concernent les concepts et comportements des systèmes complexes qui le composent. Ainsi, le développement d'un système de mesure qualitative trouve tout son sens pour :

- Examiner les problèmes en détail et en profondeur.
- Rapidement examiner le résultat de l'évaluation à mesure que de nouvelles informations apparaissent.
- Générer un système de mesure commun pour des données de nature hétérogène (numérique vs. qualitative). Les données sont généralement collectées auprès de plusieurs systèmes, de sorte que les résultats ne peuvent pas être généralisés à une norme.
- Obtenir un processus d'évaluation plus facile à manipuler que pour des mesures quantitatives.

Ainsi, l'objectif est d'établir un ensemble d'indicateurs pour évaluer la résilience avec l'écosystème des « -ilities » et en particulier des indicateurs associés à chaque zone du cycle de vie de la résilience. Il s'agit donc :

- De comprendre et analyser la structure et le fonctionnement de la résilience dans le réseau d'« -ilities ». L'ensemble des paramètres d'une relation entre une « -ility » et la résilience doit être défini pour évaluer un niveau de résilience, *i.e.*, pour une relation considéré (ex. fiabilité avec résilience)
- De développer un modèle pour obtenir un niveau de résilience pour chacune de ces zones en fonction de l'évaluation de chaque relation sur une zone considérée (ex. la résilience en zone d'anticipation est évaluée par rapport à la sécurité et la robustesse)
- D'identifier et définir les niveaux de résilience obtenus pour pouvoir les interpréter et permettre à des acteurs de les comprendre.

3. Evaluation de la résilience

3.1. Généralités sur le modèle d'évaluation

Avant de présenter l'ensemble des paramètres et le modèle d'évaluation de la résilience, nous introduisons le modèle de manière général pour faciliter la lecture et la compréhension du principe qui sera par la suite appliqué à la résilience.

Considérons un ensemble de « -ilities » source noté is appartenant à un ensemble IS tel que $IS = \{is_1, \dots, is_n\}$ et une « -ility » cible noté ic . Le modèle que nous développons évalue l'efficacité de la cible sous l'influence d'une source avec laquelle elle est en relation. Cette efficacité est notée $e_{c \leftarrow is1}$ et appartient à l'ensemble Ec tel que $Ec = \{e_{c \leftarrow is1}, \dots, e_{c \leftarrow isn}\}$.

Ce sont ces valeurs d'efficacité que nous cherchons à évaluer au travers de la définition de paramètres p appartenant à l'ensemble des paramètres P tel que $P = \{p_1, \dots, p_n\}$ et qui caractérise la relation entre une source et une cible. Ainsi de manière générale l'efficacité e d'une cible est une fonction de l'ensemble de ces paramètres tel que $e_{c \leftarrow is1} = f(p_1, \dots, p_n)$. La figure 29, présente la relation entre une « -ility » source et l' « -ility » cible qui est le principe général du modèle d'évaluation.

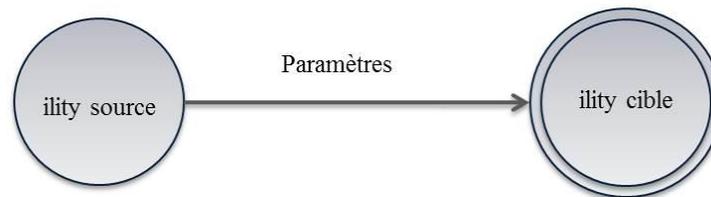


Figure 29. Principe général du modèle d'évaluation

Dans le cadre plus restreint de la résilience, nous avons identifié trois zones (anticipation, réponse et rétablissement) distinctes pour lesquelles nous cherchons l'efficacité. Cette efficacité d'une zone peut dépendre de la relation de multiples sources sur la cible (résilience). Dans ce cas, l'efficacité d'une zone sera une fonction des différentes efficacité évaluées à savoir $E_{zone} = f(e_{c \leftarrow is1}, \dots, e_{c \leftarrow isn})$.

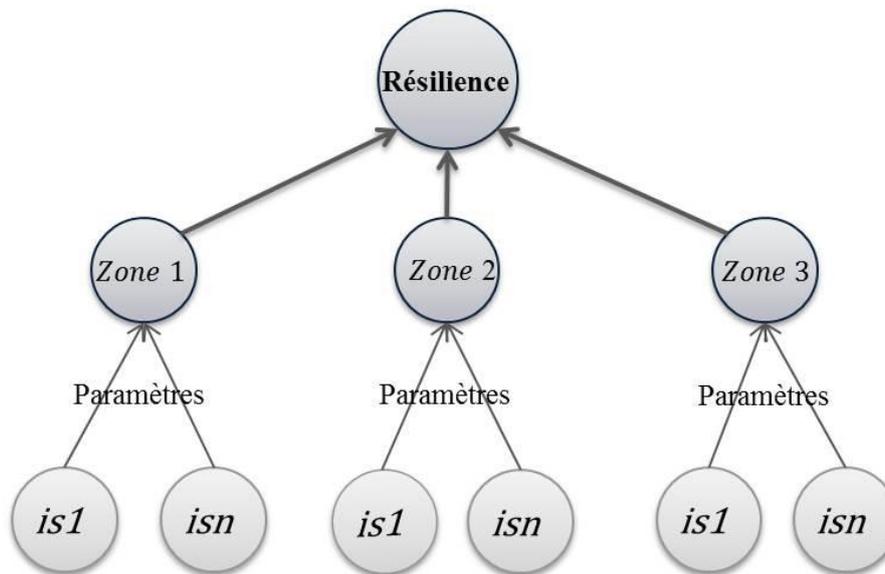


Figure 30. Principe général de l'évaluation par zone de résilience

Dans le but de développer notre modèle d'évaluation basé sur les principes exprimés précédemment, nous définissons dans la suite l'ensemble des paramètres qui permettent d'évaluer la résilience pour chacune de ses zones.

3.2 Paramètres

Nous identifions et définissons dans la suite l'ensemble des paramètres nécessaires pour évaluer la résilience. Ces paramètres sont, l'état courant (γ), l'impact (ω), l'opérabilité (ϕ), l'existence (σ) et la priorité (\triangleright). Ces primo paramètres qui prennent en compte la notion de valeur des « -ilities » (γ) et de relations entre les « -ilities » (ω , \triangleright , σ) sont nécessaires et suffisants pour obtenir une valeur de résilience (ϕ) précise et pertinente dans le cadre de son évaluation au sein de l'éco-système d'« -ilities ». Nous avons identifié au chapitre précédent un ensemble de nature de relation (e.g. compromis, compensation...) et mentionné que nous considérons uniquement l'influence dans notre cartographie et donc dans notre modèle d'évaluation. Cela ne remet pas en cause le modèle que nous développons par la suite et l'ensemble des autres relations pourra être défini et intégré au modèle initial pour gagner en précision sur le niveau de résilience.

3.2.1. L'état courant (γ)

L'état courant représente la valeur d'une « -ility » obtenue par l'utilisation de ses indicateurs qu'on peut trouver dans la littérature. Cela peut être, à titre d'exemple, la qualité d'échange pour l'interopérabilité (Qualité d'échange = nbre d'envoi/nbre de réception (Koulou, 2016) ou encore la capacité de résilience ($R(X, T) = 1 - \frac{XT}{2T^*}$,) (Zobel, 2011)). Elle peut également être exprimée de manière qualitative par un expert du domaine si aucun indicateur n'existe pour l'évaluer quantitativement. Cette valeur est indépendante des relations au sein de l'écosystème d'« -ilities ». La figure suivante présente un exemple de valeur courante d'une « -ilities » dans le réseau.



Figure 31. Valeur courante γ de l'« -ility » maintenabilité

Nous utilisons une échelle d'évaluation de l'état courant qui s'échelonne sur 5 valeurs à savoir :

- Très haute (VH). La valeur courante de l'« -ility » considérée est jugée comme excellente. Elle peut dans ce cas atteindre un niveau au-dessus de celui requis par le système pour un niveau de performance normal.
- Haute (H). La valeur courante est considérée comme bonne pour la mission du système. Aucun défaut n'est susceptible d'être constaté sur l'« -ility » considérée et qui affecterait les performances du système. A titre d'exemple la qualité d'échange d'information entre deux entités collaboratrices est de 90% se traduisant pour le système étudié par un niveau d'interopérabilité H.
- Neutre (N). La valeur courante est considérée comme normale dans le cadre de la réalisation de la mission du système. Des défauts pourront être constatés mais cela n'affectera pas la mission ni de manière durable ni à des niveaux préjudiciables. A titre d'exemple, une perte de performance due à un défaut dans l'échange d'information peut être absorbée par un accroissement d'activités d'une des entités qui collabore (ex. heures supplémentaires).
- Faible (L). La valeur courante est considérée comme pouvant entraîner des baisses de performances sur le système considéré avec des conséquences durables sur sa mission. Pour notre exemple de l'interopérabilité une qualité d'échange faible pénaliserait la réalisation de la mission notamment en termes de temps (augmentation des délais).
- Très faible (VL). La valeur courante est à un niveau tel que la mission du système peut être interrompue. A titre d'exemple, les échanges entre deux entités sont impossibles, cette situation entraînant de fait une impossibilité de réaliser une mission commune entre les entités collaboratrices.

3.2.2. L'impact (ω)

L'impact représente le degré de la variation de la cible sous l'influence de la source. Selon la valeur de la source cette variation pourra être positive ou négative mais nous ne considérons pas cet aspect dans notre modèle. Ainsi l'impact prend trois valeurs :

- H (haute). La source influence fortement la résilience. En d'autre terme, une variation de la source (à la hausse ou la diminution) entraîne une forte hausse ou baisse de la cible. La sécurité est par exemple une source dont l'impact est fort sur la résilience dans la zone d'anticipation, *i.e.*, sans sécurité l'anticipation est très faible.
- N (Neutre). La source influence moyennement la résilience. En d'autre terme, une variation de la source (à la hausse ou la diminution) entraîne une variation moyenne de la cible. Cet impact reste tout de même non marginal pour une cible dont la valeur peut varier même lorsque plusieurs autres influences entrent en jeu dans son évaluation. La stabilité est par exemple une source dont l'impact est neutre sur la résilience dans la zone d'anticipation, *i.e.*, avec la stabilité l'anticipation reste neutre.
- L (faible). La source influence faiblement la résilience. En d'autre terme, une variation de la source (à la hausse ou la diminution) entraîne une variation faible de la cible. Dans ce cas la variation de la cible reste à la marge. Par exemple, la robustesse est une source dont l'impact est faible dans la zone de réponse.

Il est à noter que cette valeur d'impact peut être différente pour une source donnée impliquée dans plusieurs zones. Ainsi, la robustesse a une valeur d'impact haute dans la zone d'anticipation alors que cette dernière est faible dans la zone de réponse. La variation de sa valeur à la hausse dans la deuxième zone de la résilience (réponse), a un impact faible sur la résilience.

3.2.3. La priorité (\triangleright)

La priorité se définit comme la comparaison des « -ilities » différentes (ou de groupe d' « -ilities ») au regard de leur développement vis-à-vis de la résilience. Elle est noté \triangleright (ex. $i_1 \triangleright i_2$ signifie que i_1 est essentielle pour la résilience par rapport à i_2 dans la zone considérée). Cette priorité peut changer en fonction de la zone considérée ainsi la robustesse peut être prioritaire par rapport à la fiabilité dans la zone d'anticipation (robustesse \triangleright fiabilité) quand cette priorité s'inverse dans la zone de réponse (fiabilité \triangleright robustesse). En effet, dans la zone de réponse la priorité est de répondre à l'évènement et, dans ce sens, la fiabilité offre la capacité au système de ne pas faillir pour pouvoir diminuer les conséquences efficacement. La robustesse quant à elle participe aussi à la réponse, mais dans une moindre mesure car ce n'est pas la résistance à un choc que l'on recherche principalement comme dans la zone d'anticipation. C'est donc bien la capacité d'agir sans défaillances et donc la fiabilité qui est convoquée prioritairement et moins la capacité de résistance et donc de robustesse. La priorité peut être définie plus finement sur trois valeurs :

- Haute (\triangleright^H). L'opérande de gauche est fortement prioritaire par rapport à l'opérande de droite. A titre d'exemple pour la zone d'anticipation la sécurité est fortement prioritaire par rapport à la changeabilité (sécurité \triangleright^H changeabilité).
- Egale ($\triangleright^=$). La priorité des deux opérandes est égale. A titre d'exemple la réactivité et la fiabilité ont la même priorité dans la zone de réponse.
- Basse (\triangleright^L). L'opérande de gauche est faiblement prioritaire par rapport à l'opérande de droite. A titre d'exemple, la maintenabilité est faiblement prioritaire par rapport à la disponibilité dans la zone de rétablissement (maintenabilité \triangleright^L disponibilité).

Le tableau suivant présente l'ensemble des priorités entre les « -ilities » sur chaque zone de la résilience. Dans ce tableau certaines exigences sont positionnées de manière non négociable, c'est-à-dire que, quel que soit le système, ce type de capacité doit toujours se situer au niveau de priorité maximum. C'est le cas par exemple pour la sécurité dans l'anticipation ou encore la maintenabilité dans le rétablissement sans lesquelles la résilience ne peut être correcte. Ces « -ilities » présentent des capacités importantes pour la réalisation de la résilience, ne peuvent être modifiées en termes de priorité et sont toujours prioritaires par rapport aux autres.

En revanche les autres « -ilities » positionnées aux autres niveaux de priorités peuvent être déplacées selon le système considéré ou les besoins des utilisateurs. C'est par exemple le cas pour l'interopérabilité qui peut être de priorité maximum dans un système collaboratif et minimale (voir neutre) dans un autre ou les interactions n'existent pas. Ces « -ilities » présentent des capacités importantes pour la résilience mais peuvent évoluer à travers les niveaux et être plus ou moins prioritaires par rapport aux autres selon le système étudié. Ainsi pour une zone considérée :

- La priorité entre les « -ilities » appartenant à la même cellule est de type égale ($\triangleright^=$).
- La priorité entre deux cellules adjacentes ou non est de type basse (\triangleright^L) ou haute (\triangleright^H).

Pour résumé, la priorité est donc un paramètre qui permet de classer les « -ilities » au regard de leur importance pour la résilience. Pour cela, nous définissons trois groupes de priorité qui traduisent l'importance des capacités fournies par les « -ilities » pour la résilience. Cette échelle permet à l'utilisateur de décider et positionner l'ensemble des « -ilities » qui concernent son système et leur importance pour la résilience. Le groupe 1 intègre un ensemble d'« -ilities » qui sont indispensables et ne peuvent être déplacées sur les autres groupes. L'utilisateur peut ajouter des « -ilities » dans ce groupe car prioritaires pour son propre système. Les groupes 2 et 3 sont construits par l'utilisateur directement en fonction de son système. Enfin, il est à noter que le groupe 1 est prioritaire par rapport au groupe 2, lui-même prioritaire par rapport au groupe 3. L'utilisateur peut alors affiner ces priorités à l'aide des indicateurs Haut, Egal et Bas.

Tableau 10. Illustration de table des priorités selon la dynamique de la résilience

Groupe de priorité	Dynamique de la résilience		
	Anticipation	Réponse	Rétablissement
Groupe 1	<ul style="list-style-type: none"> • Sécurité • Robustesse 	<ul style="list-style-type: none"> • Survivabilité • Réactivité • Fiabilité • Sustainabilité 	<ul style="list-style-type: none"> • Maintenabilité • Reconfigurabilité • Reparabilité
Groupe 2	<ul style="list-style-type: none"> • Fiabilité • Interopérabilité • Testabilité 	<ul style="list-style-type: none"> • Accessibilité • Agilité • Flexibilité • Disponibilité • Durabilité • Interopérabilité • Stabilité • Testabilité 	<ul style="list-style-type: none"> • Fiabilité • Disponibilité • Agilité • Changeabilité • Testabilité • Modificabilité • Réactivité
Groupe 3	<ul style="list-style-type: none"> • Accessibilité • Changabilité • Contrôlabilité • Disponibilité • Modificabilité 	<ul style="list-style-type: none"> • Changeabilité • Modificabilité • Contrôlabilité • Maintenabilité • Modularité • Robustesse 	<ul style="list-style-type: none"> • Contrôlabilité • Interopérabilité • Stabilité

3.2.4. L'existence (σ)

L'existence se définit comme la présence d'une « -ility » caractérisée comme source dans le graphe des relations. En d'autre terme, l'existence identifie l'ensemble des « -ilities » source qui influence la résilience et qui sera considéré pour l'évaluation. L'existence est évaluée sur l'échelle de valeur (1,0), 1 signifiant que l'« -ility » sera considérée pour l'évaluation 0 sinon. L'existence permet ainsi à une personne (utilisateur) d'adapter son modèle d'évaluation aux spécificités de son système.

Le résultat est donc un graphe de relation ne contenant uniquement que les sources qui vont influencer la cible. A titre d'exemple pour évaluer la zone d'anticipation et compte tenu du système considéré seule la sécurité et la robustesse participent à l'évaluation de la résilience (les autres peuvent être négligées ou encore non développées sur le système). Le graphe de relation résultant serait donc représenté par la figure suivante.

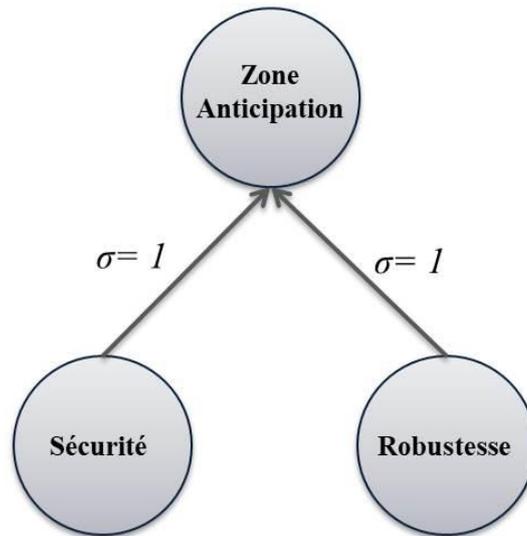


Figure 32. Exemple de graphe de relation pour la zone d’anticipation avec l’existence de la sécurité et de la robustesse.

3.2.5. L’opérabilité (Φ)

L’opérabilité caractérise le niveau d’une « -ility » (ici, la résilience) en fonction du niveau des autres « -ilities » avec lesquelles elle est en relation dans le réseau. Elle exprime ainsi l’efficacité d’une « -ility » exclusivement en considérant l’écosystème d’« -ilities ». Dans le cas de la résilience l’évaluation s’appuie sur la cartographie des relations et la cartographie de la dynamique de la résilience. Elle s’appuie également sur les paramètres définis précédemment à savoir l’état courant (γ), l’impact (ω), la priorité (▷) et l’existence (σ).

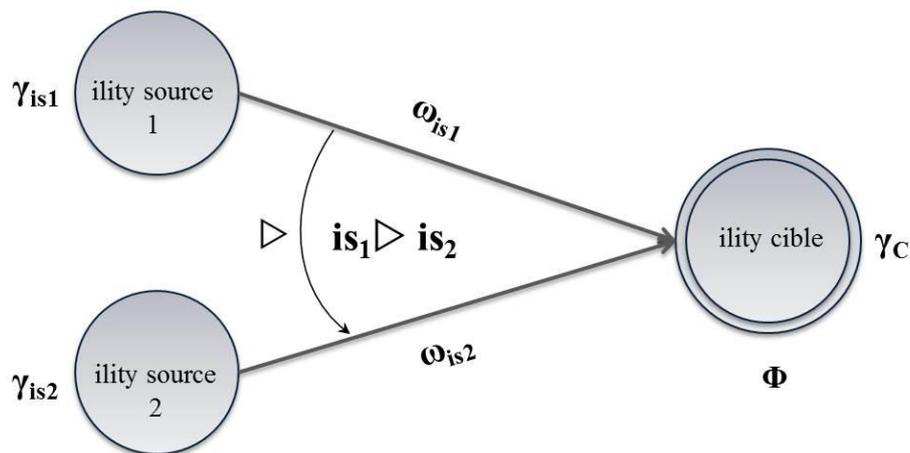


Figure 33. Opérabilité et ses paramètres positionnés entre deux « -ilities » sources et une « -ility » cible

Ainsi, l’opérabilité est une fonction qui dépend des paramètres qui caractérisent d’une part un « -ility » source et sa relation avec l’ « -ility » cible qu’elle influence :

$$\Phi = f(\gamma, \omega, \triangleright, \sigma) \tag{1}$$

L'opérabilité est évaluée sur l'échelle de valeur suivante :

- *VH (très haute)*. La résilience obtenue dans le réseau se situe à un niveau au-delà de ce qui peut être attendu. A titre d'exemple, dans la zone d'anticipation, le système peut faire face à des événements qui ne sont pas nécessairement prévus et anticipés en termes de nature et d'intensité (ex. poursuite de la mission pendant un temps limité à un niveau de performance nominal).
- *H (haute)*. La résilience se situe au-delà de ce qui peut être attendu également. Dans la zone d'anticipation, le système peut faire face à des événements prévus et anticipés mais pas d'intensité supérieure à la prévision.
- *N (normale)*. La résilience dans le réseau est au niveau prévu. A titre d'illustration pour la zone de réponse, le système peut perdre des performances jusqu'au à un niveau acceptable.
- *L (basse)*. La résilience est en dessous des valeurs attendues ou acceptables. Cela se traduit par exemple, dans la zone de rétablissement, par un retour à un niveau de performances non acceptables et/ ou dans un temps au-delà de ce qui est attendu.
- *VL (très basse)*. La résilience est à un niveau tel que le système converge vers l'impossibilité de poursuivre sa mission. Dans la zone de rétablissement, par exemple, il entre dans une zone telle que toutes les activités mises en œuvre n'ont aucun effet pour basculer dans la zone de rétablissement et qu'il tend vers l'arrêt de sa mission ou à un niveau très faible.

3.3. Hypothèses

Avant d'aller plus loin dans le développement de notre modèle d'évaluation, nous définissons un ensemble d'hypothèses dans le but d'une part de le restreindre aux seuls concepts qui nous intéressent et de le simplifier d'autre part pour faciliter son expression.

Hypothèse 1. Seule la relation d'influence est considérée dans le modèle d'évaluation. Les autres relations possibles (définies au chapitre 3) telles que la compensation ou encore la substitution ne sont pas considérées.

Hypothèse 2. Les mécanismes de propagation (ex. boucle sécurité-résilience-durabilité) ne sont pas considérés dans le modèle d'évaluation.

Hypothèse 3. Seules les valeurs d'opérabilité par zone sont évaluées. Le modèle ne les agrège pas pour déterminer une opérabilité globale.

Hypothèse 4. Le modèle fournit une valeur de résilience qui sera interprétée sous forme de plage de valeur sur la courbe de la résilience.

Hypothèse 5. Si l'opérabilité d'une source n'est pas connue, le modèle d'évaluation considère le paramètre de valeur courante de la source par défaut (l'opérabilité est négligée).

Hypothèse 6. La méthode d'évaluation reste sur la base de la dynamique de résilience principale : anticipation, réponse et rétablissement. Elle ne considère pas la décomposition des zones (ex. anticipation : prévention et préparation).

3.4. Modèle d'évaluation

3.4.1. Evaluation de l'opérabilité d'une source sur la résilience

L'évaluation de l'opérabilité d'une source sur la résilience tient compte des paramètres d'existence (σ), d'impact (ω) et de valeur courante (γ).

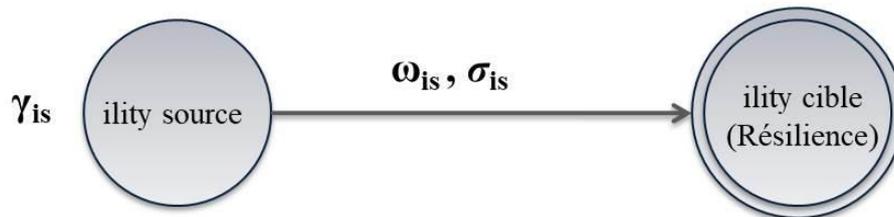


Figure 34. Paramètres pour l'évaluation de la résilience sous l'influence d'une source

L'opérabilité d'une source sur la résilience est définie comme le produit de convolution entre l'impact de la source sur la cible et la valeur courante de la source (équation 2) lorsque l'existence de la relation est validée dans le graphe de relation, *i.e.*, $\sigma=1$ (dans l'autre cas l'opérabilité n'est pas calculée puisque la relation n'est pas considérée).

$$\Phi_{ic} = \omega_{ic} * \gamma_{is} \quad [2]$$

Ainsi en fonction de l'impact de la source qui fait varier la cible et de sa valeur courante calculée et positionnée sur l'échelle de valeur que nous avons définie, nous obtenons l'opérabilité de la cible comme montré dans le tableau suivant. La règle de convolution est basée sur une combinaison qualitative, qui permet d'avoir un produit en combinant la valeur courante et l'impact. Le résultat de cette convolution est présenté dans le tableau suivant avec l'ensemble des combinaisons sur les valeurs d'impacts et courantes.

Ce tableau d'opérabilité est générique, c'est à dire qu'il peut s'appliquer à l'évaluation de l'opérabilité d'une cible sous l'influence de n'importe quelle source dans le graphe de relation utilisé pour l'évaluation.

Tableau 11. Tableau d'opérabilité résultant de l'influence de la source

$\Theta_{is \rightarrow ic}$ γ_{is}	L	N	H
VL	L	VL	VL
L	N	L	VL
N	N	N	N
H	N	H	VH
VH	H	VH	VH
Justif.	Lorsque l'impact sur la cible est faible, la valeur d'opérabilité varie faiblement vers le haut ou vers le bas quand la valeur courante augmente ou diminue vers les valeurs extrêmes (VH et VL). Dans l'intervalle, l'opérabilité tendra vers le neutre. La valeur d'impact étant faible la variation sera donc limitée.	Lorsque l'impact sur la cible est neutre la valeur d'opérabilité tendra vers la valeur courante de la source.	Lorsque l'impact sur la cible est fort, la valeur d'opérabilité tendra vers les valeurs extrêmes (VH ou VL) quand la valeur courante augmentera ou diminuera même en deçà des valeurs les plus fortes (H ou F). Dans l'intervalle, l'opérabilité tendra vers le neutre. La valeur d'impact étant forte la variation sera conséquente.
Ex.	Si l'interopérabilité n'impacte que faiblement la résilience, celle-ci ne variera pas beaucoup sous son influence car peu sollicitée par le système avec peu de répercussion sur sa mission.	Si la fiabilité a un impact neutre, la résilience ne variera pas et restera au niveau de valeur courante.	Si la sécurité impacte fortement la résilience, une valeur faible ou très faible conduira à un défaut de résilience. La mission du système peut être compromise. Dans le cas contraire la résilience tendra vers des valeurs très fortes.

Ainsi, il s'agit dans un premier temps d'évaluer l'opérabilité de toutes les « -ilites » source sur la résilience. Ensuite, il est nécessaire d'évaluer l'opérabilité pour chaque zone de la dynamique de la résilience et en tenant compte des différentes priorités entre les différentes « -ilites ».

3.4.2. Evaluation de l'opérabilité de plusieurs sources sur la cible

L'évaluation de l'opérabilité de plusieurs sources sur la cible s'appuie sur les différentes opérabilités issues de l'évaluation de chaque relation du graphe pour chaque zone (une source sur la cible) et intègre également le paramètre de priorité (\triangleright) défini précédemment.

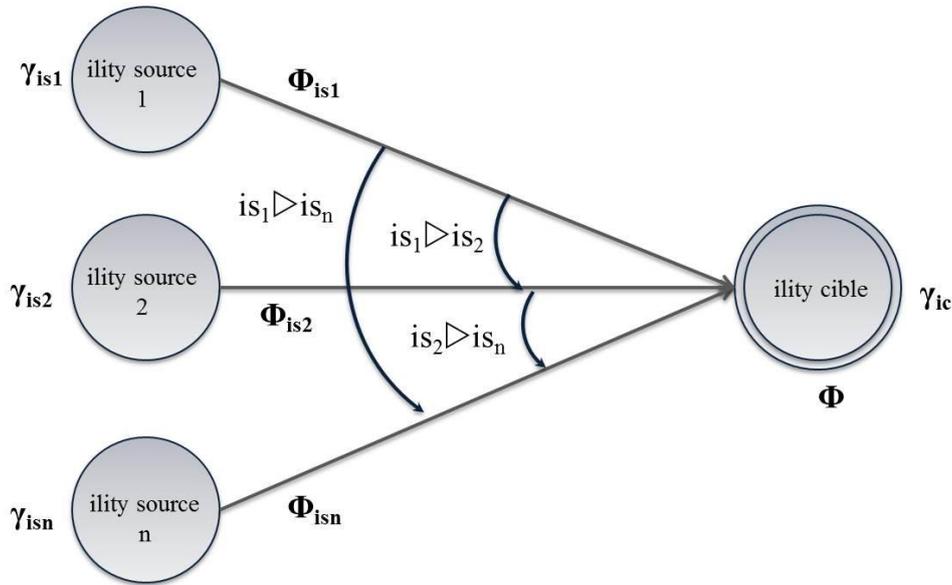


Figure 35. Paramètres utilisés pour l'évaluation de la résilience sous l'influence de plusieurs « -ilities »

Ainsi, l'opérabilité obtenue des différentes opérabilités est une fonction qui dépend de la priorité entre les différentes « -ilities » et des opérabilités issues de l'influence de ces « -ilities » sur la résilience. Cette opérabilité est évaluée pour chaque zone de la dynamique de la résilience.

$$\Phi_{cn} = f(\triangleright, \Phi_1, \dots, \Phi_n) \tag{3}$$

3.4.2.1 - évaluation au sein d'un groupe (ex. $is1 \triangleright^= is2$)

Les « -ilities » au sein d'un même groupe sont considérées de priorités identiques. Dans ce cas nous nous intéressons à l'analyse des valeurs d'opérabilité produites par l'ensemble de ces « -ilities ». Nous retenons la valeur minimale parmi l'ensemble des opérabilités.

$$\Phi_{cg} = \min(\Phi_1, \dots, \Phi_n) \tag{4}$$

A titre d'exemple, la maintenabilité et la reconfigurabilité (zone 3) sont dans le même groupe donc leur priorité est égale ($\triangleright^=$). La valeur d'opérabilité est donc la valeur minimale des deux opérabilités issues des deux « -ilities ». Ainsi, si l'opérabilité issue de la maintenabilité est très basse ($\Phi_1 = VL$) et celle de la reconfigurabilité neutre ($\Phi_1 = M$), c'est la valeur la plus faible qui est retenue. En effet sans maintenabilité la résilience est faible et ne peut être améliorée simplement par la reconfigurabilité.

On obtient donc le tableau dévaluation suivant.

Tableau 12. Table d'évaluation au sein d'un même groupe de « -ilities »

		Φ_2				
		VL	L	N	H	VH
Φ_1	VL	$\text{Min}(\Phi_1, \Phi_2)$				
	L					
	N					
	H					
	VH					

3.4.2.2 – Evaluation entre deux groupes (ex. $i_{G1} \triangleright^H i_{G2}$ ou $i_{G1} \triangleright^L i_{G2}$)

Cas 1. Valeur d'opérabilité de l'« -ility » prioritaire inférieure à l'« -ility » secondaire :
 $\Phi_1 < \Phi_2$

Dans ce cas, quel que soit la précision de la priorité (haute, faible), l'opérabilité résultante du groupe est la valeur d'opérabilité de l'« -ility » prioritaire.

$$\Phi_{cg} = \Phi_n \tag{5}$$

A titre d'exemple pour la robustesse et la réactivité dans la zone de réponse, la réactivité a une priorité supérieure à la robustesse (réactivité \triangleright robustesse). Quel que soit le degré de priorité (H ou L) si l'opérabilité résultante de la réactivité (Φ_1) est inférieure à celle résultante de la robustesse (Φ_2), c'est l'opérabilité de l'« ility » prioritaire qui traduira le niveau de résilience du système (ex. $\Phi_1 < \Phi_2$, $L < H$, $\Phi_{cg} = L$). En effet, c'est la réactivité qui est attendue prioritairement par la résilience dans la zone de réponse.

On obtient donc le tableau dévaluation suivant.

Tableau 13. Table d'évaluation entre deux groupes pour $\Phi_{G1} < \Phi_{G2}$

		Φ_{G2}				
		VL	L	N	H	VH
Φ_{G1}	VL	VL	VL	VL	VL	VL
	L		L	L	L	L
	N			N	N	N
	H				H	H
	VH					VH

Cas 2 Valeur d'opérabilité de l'« -ility » prioritaire supérieure à l'ility secondaire : $\Phi_1 > \Phi_2$

Dans ce cas, l'opérabilité résultante nécessite l'analyse de la précision de la priorité entre les « -ilities ». En effet, selon que cette priorité soit forte (\triangleright^H) ou faible (\triangleright^L) l'opérabilité ne sera plus la valeur Φ_1 ou Φ_2 mais une valeur comprise entre les deux valeurs. Ainsi, dans le cas où l'« -ility » (ou groupe) prioritaire est de priorité haute par rapport à l' « -ility » (ou groupe) secondaire ($i1 \triangleright^H i2$), la valeur résultante d'opérabilité se rapprochera de Φ_1 avec une faible décroissance dû à Φ_2 . Le tableau suivant présente l'évaluation résultante de cette priorité.

Tableau 14. Tableau final d'évaluation entre 2 groupes avec $i_{G1} \triangleright^H i_{G2}$

$\Phi_1 \triangleright^H \Phi_2$		Φ_{G2}				
		VL	L	N	H	VH
Φ_{G1}	VL					
	L	L				
	N	L	N			
	H	N	N	H		
	VH	H	H	VH	VH	

Dans le cas où l'« -ility » (ou groupe) prioritaire est de priorité faible par rapport à l'« -ility » (ou groupe) secondaire ($i_1 \triangleright^L i_2$) la valeur résultante d'opérabilité se rapprochera de Φ_2 avec une forte décroissance dû à Φ_2 . Le tableau suivant présente l'évaluation résultante de cette priorité.

Tableau 15. Tableau final d'évaluation entre 2 groupes avec $i_{G1} \triangleright^L i_{G2}$

$\Phi_{G1} \nabla^L \Phi_{G2}$		Φ_{G2}				
		VL	L	N	H	VH
Φ_{G1}	VL					
	L	VL				
	N	VL	L			
	H	L	L	N		
	VH	L	N	H	H	

3.4.2.3 Evaluation de l'opérabilité entre les trois groupes de priorité

En considérant les priorités définies précédemment et telle que pour chaque groupe de la dynamique de la résilience $\Phi_{G1} \triangleright \Phi_{G2} \triangleright \Phi_{G3}$ avec des précisions de priorités (H/L) définies selon le système à l'étude, le tableau suivant présente les combinaisons possibles d'évaluation. En se positionnant sur le cas identifié, l'utilisateur obtient l'opérateur d'évaluation de résilience finale pour une zone. Il doit par la suite utiliser les tables définies précédemment pour obtenir la valeur de résilience de son système.

Nous pouvons noter trois points particuliers dans ce tableau d'évaluation :

1. L'opérateur d'évaluation n'étant pas associatif, nous présentons dans la ligne 2 les différents opérateurs possibles selon les différentes priorités entre les groupes.
2. Il n'existe pas d'opérateur dans les cas impossibles.
3. Les opérateurs proposés concernent une évaluation pessimiste de la résilience et aboutiront à un résultat de la résilience qui ne pourra pas être inférieur. Cela signifie que le système adopte une position de précaution au regard de sa résilience, des événements qu'il peut subir et de sa mission.

Tableau 16. Evaluation de la résilience entre les trois groupes de priorité

Cas			Evaluation de la résilience
$\Phi_{G1} > \Phi_{G2}$	$\Phi_{G2} > \Phi_{G3}$	$\Phi_{G3} > \Phi_{G1}$	impossible
$\Phi_{G1} > \Phi_{G2}$	$\Phi_{G2} > \Phi_{G3}$	$\Phi_{G3} < \Phi_{G1}$	cas1 : $\Phi_{G1} \triangleright^H(\Phi_{G2} \triangleright^H \Phi_{G3})$ cas2 : $\Phi_{G1} \triangleright^H(\Phi_{G2} \triangleright^L \Phi_{G3})$ cas3 : $\Phi_{G1} \triangleright^L(\Phi_{G2} \triangleright^H \Phi_{G3})$ cas4 : $(\Phi_{G1} \triangleright^L \Phi_{G2}) \triangleright^L \Phi_{G3}$
$\Phi_{G1} > \Phi_{G2}$	$\Phi_{G2} < \Phi_{G3}$	$\Phi_{G3} > \Phi_{G1}$	$\Phi_{G1} \triangleright ?\Phi_{G2}$
$\Phi_{G1} > \Phi_{G2}$	$\Phi_{G2} < \Phi_{G3}$	$\Phi_{G3} < \Phi_{G1}$	$\Phi_{G1} \triangleright ?\Phi_{G2}$
$\Phi_{G1} < \Phi_{G2}$	$\Phi_{G2} > \Phi_{G3}$	$\Phi_{G3} > \Phi_{G1}$	Φ_{G1}
$\Phi_{G1} < \Phi_{G2}$	$\Phi_{G2} > \Phi_{G3}$	$\Phi_{G3} < \Phi_{G1}$	$\Phi_{G1} \triangleright^H \Phi_{G3}$
$\Phi_{G1} < \Phi_{G2}$	$\Phi_{G2} < \Phi_{G3}$	$\Phi_{G3} > \Phi_{G1}$	Φ_{G1}
$\Phi_{G1} < \Phi_{G2}$	$\Phi_{G2} < \Phi_{G3}$	$\Phi_{G3} < \Phi_{G1}$	impossible

4. Modèles d'interprétation de l'évaluation

Le modèle d'interprétation des différentes valeurs d'opérabilité est réalisé à l'aide de la courbe (figure 37) établissant le lien entre les performances du système et le temps sur les étapes de la dynamique de la résilience (anticipation, réponse et rétablissement). L'objectif de cette interprétation est de fournir un ensemble d'information permettant à des parties prenantes d'avoir une vision de leur niveau de résilience sur chaque zone et au regard des possibilités de fourniture du service par le système. En outre, ces informations doivent également guider ces parties prenantes dans les actions à engager pour corriger à court terme les défauts de résilience (i.e., ante- et per- événement) mais également pour améliorer la résilience du système à moyen et long terme (i.e., post-événement).

Afin de fournir un niveau d'interprétation précis, nous définissons d'une part plusieurs points d'intérêts sur la courbe qui seront détaillés dans l'interprétation de chaque zone et l'intensité de l'évènement (*i*) à laquelle le système fait face à savoir :

- Extraordinaire. Il s'agit d'évènements auxquels le système n'a jamais été confronté au cours sa vie ou encore une combinaison d'évènements identifiés mais dont l'intensité est supérieure au niveau maximal connu.
- Majeur. Il s'agit d'évènements connus et auxquels le système a déjà été confronté ou est susceptible d'être confronté au cours de sa vie. Ces évènements sont d'intensités égales à celles identifiées mais inférieures ou égales aux extrêmes connus.

- Normal. Il s'agit d'événements connus et auxquels le système a déjà été confronté ou est susceptible d'être confronté au cours de sa vie. Ces événements sont d'intensités maximales prévues.
- Faible. Il s'agit d'événements connus et auxquels le système a déjà été confronté ou est susceptible d'être confronté au cours de sa vie. Ces événements sont d'intensité faible c'est-à-dire inférieure à l'intensité normale prévue.
- Très faible. Il s'agit d'événements connus et auxquels le système a déjà été confronté ou est susceptible d'être confronté au cours de sa vie. Ces événements sont d'intensité très faible.

Ainsi, pour l'interprétation du niveau de résilience dans chaque zone, les différents points d'intérêts, intensités et valeurs de résilience sont d'une part positionnés sur la courbe et interprétés dans un tableau pour faciliter la compréhension de la valeur de résilience obtenue d'autre part.

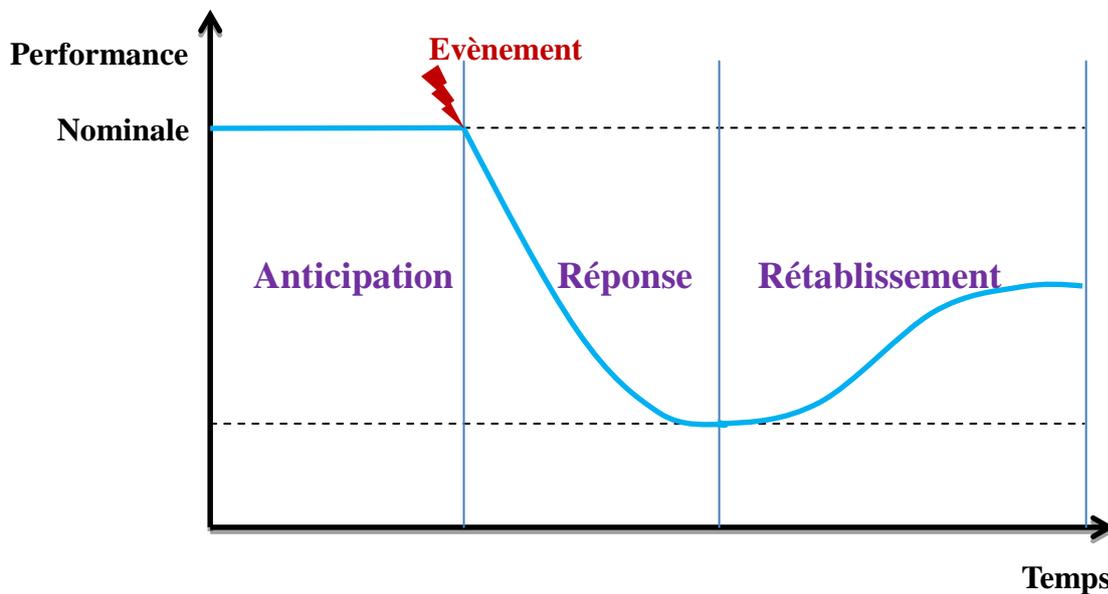


Figure 36. Courbe de résilience pour l'interprétation

4.1. Interprétation de l'opérabilité dans la zone d'anticipation

La valeur d'opérabilité pour la zone d'anticipation s'interprète par rapport à l'évènement impactant le système et par rapport à la temporalité liée à celui-ci, *i.e.*, la durée pendant laquelle le système poursuit sa mission au niveau de performance nominale. En effet, c'est de la capacité du système à faire face à un ensemble d'évènements et à poursuivre sa mission que la résilience est évaluée pour cette zone. Il s'agit donc d'interpréter la valeur de résilience en fonction de ces critères (intensité de l'évènement, temps). Afin d'évaluer finement cette capacité, le point d'intérêt identifié sur la courbe est la performance nominale c'est-à-dire le niveau de performance délivrée par le système en fonctionnement normal (*e.g.* sans perturbation).

Pour illustrer ces différents niveaux, la figure suivante positionne la valeur d'opérabilité sur la courbe de résilience/performance d'un système en fonction de l'intensité de l'événement.

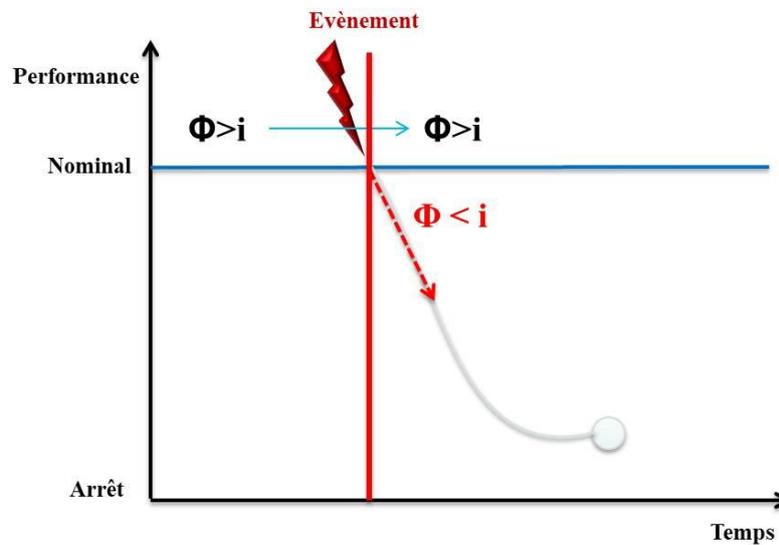


Figure 37. Positionnement des valeurs d'opérabilité pour la zone d'anticipation

Lorsque la valeur de résilience évaluée est inférieure à l'intensité de l'événement ($\Phi < i$), le système n'est plus en mesure de poursuivre sa mission au niveau de performance nominale (il entre donc dans la zone de réponse). Dans le cas où la valeur de résilience est supérieure à l'intensité de l'événement ($\Phi > i$), le système peut être en mesure de poursuivre sa mission au niveau de performance nominale. En fonction de l'intensité, la poursuite de la mission peut être maintenue dans le temps, jusqu'au passage dans la zone de réponse.

Ainsi, en analysant les paramètres de la zone d'anticipation (temps, événement) pour chaque valeur, nous définissons le tableau d'interprétation suivant.

Tableau 17. Interprétation des valeurs d'opérabilité pour la zone d'anticipation

Niveau d'anticipation	Interprétation
Très haut (VH) :	Le système peut être en mesure de faire face à des événements perturbateurs d'intensité extraordinaire c'est-à-dire qui ne sont pas identifiés (ex. non occurrence passé de cet événement) ou encore une combinaison d'évènements identifiés et d'intensité supérieure aux extrêmes connus. Il peut donc être capable de poursuivre sa mission le temps que des actions soit engagées pour revenir à un état non (ou moins) perturbé.
Haut (H)	Le système peut être en mesure de poursuivre sa mission au niveau de performance nominale face à un événement perturbateur identifié et d'intensité supérieure à celle identifiée mais inférieure ou égale aux extrêmes connus. Il peut être capable de poursuivre sa mission dans un temps limité.
Neutre (N)	Le système est capable de poursuivre sa mission au niveau de performance nominale face à des événements d'intensité maximale prévue. Il peut poursuivre sa mission tant que l'évènement reste dans les limites identifiées et pour une durée limitée.
Bas (L)	Le système est capable de faire face à des événements de faible intensité (inférieure aux intensités normales prévues).
Très bas (VL)	Le système est capable de faire face à des événements d'intensité très faible.

4.2. Interprétation de l'opérabilité dans la zone de réponse

La valeur d'opérabilité pour la zone de réponse s'interprète par rapport à la performance perdue par le système suite à un événement et à la durée de cette perte. Afin d'évaluer finement cette capacité, plusieurs point d'intérêt sont identifiés sur la courbe à savoir :

1. La performance minimale acceptable. Il s'agit du niveau de performance pour lequel le système est en mesure de délivrer un service avec un niveau de performance dégradée mais acceptable, *i.e.*, les parties prenantes intéressées acceptent encore la fourniture du service. Ce niveau peut être défini a priori (avant l'évènement) et ajusté si nécessaire.
2. La performance minimale finale. Il s'agit du niveau pour lequel le système n'est plus en mesure de fournir un service à un niveau de qualité acceptable. Le système ne fournit plus le service initial ou même dégradé.

3. L'arrêt. A ce niveau, le système n'a pas été en capacité d'absorber et de s'adapter à l'évènement. Il n'est plus en mesure de fournir un service acceptable et s'arrête ainsi de fonctionner (niveau de performance nulle).
4. La performance de réponse atteinte. Il s'agit du niveau de performance atteinte suite à la réponse à l'évènement. Ce niveau se situe entre le niveau de performance nominale post évènement et l'arrêt du système (niveau de performance nulle).

La figure suivante présente la zone de réponse incluant d'une part les différents points d'intérêt mentionnés précédemment et les différentes valeurs d'opérabilité d'autre part.

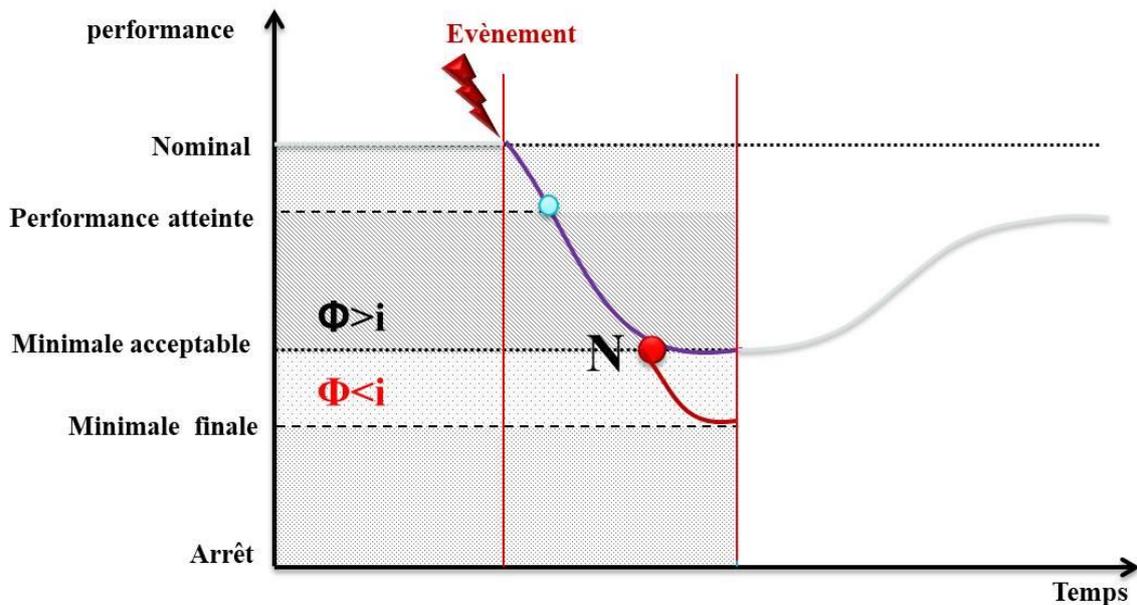


Figure 38. Positionnement des valeurs d'opérabilité pour la zone de réponse

Lorsque la valeur de résilience évaluée est supérieure à l'intensité de l'évènement ($\Phi > i$), le système répond à l'évènement pour tendre vers un point de performance de réponse situé entre la performance nominale et la performance minimale acceptable qu'il peut maintenir et rentrer ainsi dans la zone de rétablissement. Plus l'intensité de l'évènement se rapprochera de la capacité de résilience face à cet évènement est plus le système tendra vers le niveau de performance acceptable. Dans le cas où la valeur de résilience est inférieure à l'intensité de l'évènement ($\Phi < i$), il entrera dans une zone entre la performance minimale acceptable et l'arrêt du service. Dans cette zone, un niveau de performance minimale finale doit être identifié et au-delà duquel toutes actions engagées s'avèrent inutiles pour basculer dans la zone de rétablissement. Plus l'intensité de l'évènement par rapport au niveau de résilience est importante et plus le système tendra vers l'arrêt de service.

Ainsi, en analysant les différents paramètres de la zone de réponse (performance, durée, point d'intérêt) pour chaque valeur, nous définissons le tableau d'interprétation suivant.

Tableau 18. Interprétation des valeurs d'opérabilité pour la zone de réponse

Niveau de réponse	Interprétation
Très haut (VH) :	Le système est capable de répondre à des événements d'intensité supérieure aux extrêmes connus. La perte de performance est faible et/ou limitée dans le temps.
Haut (H)	Le système est capable de répondre à un événement perturbateur identifié et d'intensité supérieure à celle identifiée mais inférieure ou égale aux extrêmes connus.
Neutre (N)	Le système est capable de répondre à des événements d'intensité maximale prévue. Si l'intensité de l'évènement se rapproche de la valeur de résilience, le système tendra vers le niveau de performance minimale acceptable.
Bas (L)	Le système est capable de répondre à des événements d'intensité faible (inférieure à l'intensité prévue). Un dépassement de l'intensité, même mineure, conduit le système vers son niveau de performance minimale finale
Très bas (VL)	Le système est capable de répondre à des événements d'intensité très faible. Un simple dépassement de l'intensité conduit le système au-delà du niveau de performance minimale finale.

4.3 Interprétation de l'opérabilité dans la zone de rétablissement

La valeur d'opérabilité pour la zone de rétablissement s'interprète par rapport à la performance fournie par le système suite à la mise en œuvre d'actions pour rétablir un niveau de performance et la durée pour obtenir ce niveau. Afin d'évaluer finement cette capacité, plusieurs points d'intérêt sont identifiés sur la courbe à savoir :

1. La performance de retour acceptable. Il s'agit du niveau de performance pour lequel le service peut toujours être délivré et accepté par les parties prenantes utilisatrices du système. Le système fonctionne ainsi dans un mode dégradé qui produit un service de qualité moindre au niveau nominal et qui peut être maintenu dans le temps.
2. La performance de retour atteinte. Il s'agit du niveau de performance atteinte suite à la mise en œuvre des actions de rétablissement du système. Ce niveau se situe entre le niveau de performance de réponse atteinte et le niveau de performance nominale.

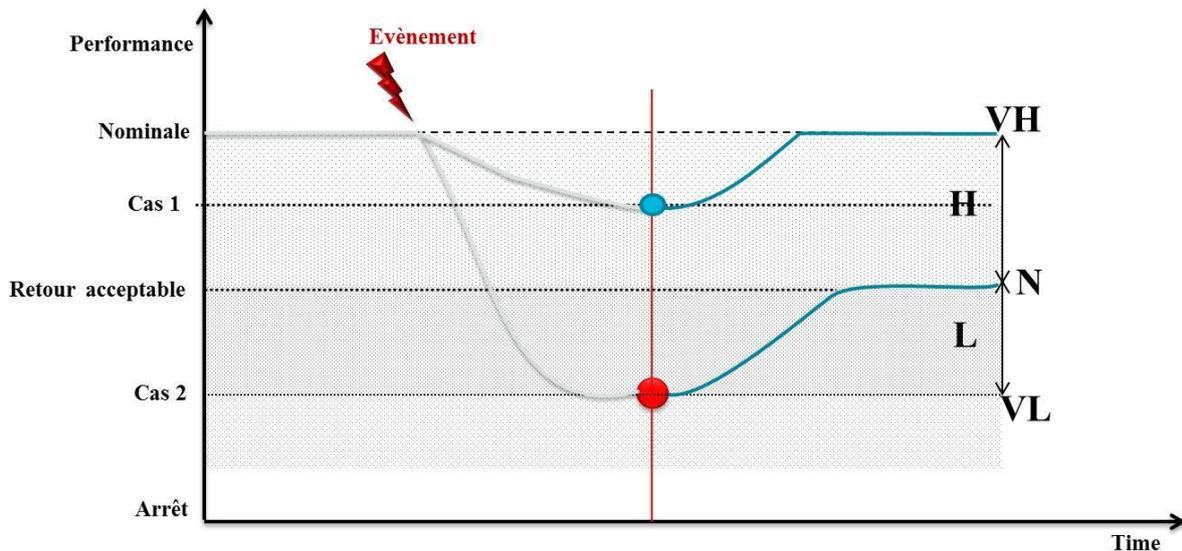


Figure 39. Positionnement de valeurs d'opérabilité pour la zone de rétablissement

Lorsque le niveau de performance de départ de la zone de rétablissement (performance de réponse atteinte) est supérieur au niveau de performance de retour acceptable (*i.e.*, entre le niveau de retour acceptable et le niveau de performance nominale – cas 1), le système est dans une situation dans laquelle il peut maintenir un niveau de service acceptable pour les parties prenantes utilisatrices dans le temps. Cependant, plus le niveau de résilience sera haut ($\Phi \geq$ Neutre) et plus le retour au niveau de performance nominale est possible dans un temps limité. Inversement, à des niveaux de résilience faible ($\Phi <$ Neutre), le retour au niveau de performance initiale peut ne pas être réalisé et le niveau de performance de retour atteinte rester au niveau de performance de réponse atteinte.

Lorsque le niveau de performance de départ de la zone de rétablissement (performance de réponse atteinte) est inférieur au niveau de performance de retour acceptable (*i.e.*, entre le niveau de performance minimale finale et le niveau de retour acceptable – cas 2), le niveau de rétablissement dépendra du point de départ et du niveau de résilience évalué. Ainsi, plus le niveau de performance de départ sera proche du niveau de performance minimale finale et plus il sera long et difficile (voire impossible) de rétablir le système à un niveau de performance acceptable.

Ainsi, en analysant les différents paramètres de la zone de rétablissement (performance, durée, points d'intérêts) pour chaque valeur, nous définissons le tableau d'interprétation suivant. Cette interprétation ne présente que le cas où la performance de départ de la zone de rétablissement est inférieure au niveau de performance de retour acceptable.

Tableau 19. Interprétation des valeurs d'opérabilité pour la zone de rétablissement

Niveau d'opérabilité	Interprétation
Très haute (VH) :	Le système est capable, à partir de n'importe quel point de départ entre la performance minimale finale et le retour acceptable de se rétablir dans un état de performance nominal et dans un temps limité et défini.
Haute (H)	Le système est capable de se rétablir à un niveau de performance compris entre le niveau de performance acceptable et le niveau de performance nominale et dans un temps limité et défini.
Neutre (N)	Le système est capable de se rétablir à un niveau de performance de retour acceptable et dans un temps limité et défini.
Basse (L)	Le système est capable de se rétablir à un niveau de performance supérieure au niveau de performance de réponse atteinte mais inférieur au niveau de performance acceptable et dans un temps long.
Très basse (VL)	Le système n'est pas en mesure de se rétablir à un niveau de performance acceptable. La reprise de performance du système est lente, le niveau de performance étant susceptible d'être maintenu au niveau de performance de réponse atteinte.

5. Calcul de l'opérabilité globale finale

Bien que l'hypothèse 3 exprime que notre modèle ne fournit pas de valeur agrégée des opérabilités calculées pour chaque zone, il est possible pour un utilisateur qui le souhaite d'obtenir cette valeur. A cet effet, nous fournissons un modèle pour obtenir une valeur d'opérabilité globale finale (ou résilience finale) qui représente une valeur unique considérant les opérabilités d'anticipation, de réponse et de rétablissement.

Il existe deux stratégies pour obtenir l'opérabilité globale :

1. L'opérabilité est calculée pour chaque zone en utilisant les opérateurs précédents (Φ_{Z1} , Φ_{Z2} , Φ_{Z3}). La valeur courante de la résilience (γ) est calculée pour chaque zone (γ_{Z1} , γ_{Z2} , γ_{Z3}) à l'aide des indicateurs issus de la littérature. Par exemple (Henry, 2012) offre un indicateur pour la zone de rétablissement (γ_{Z3}), (Royce, 2014) pour la zone de réponse (γ_{Z2}) ou encore (Cox, 2011) pour la zone d'anticipation (γ_{Z1}). En utilisant le tableau suivant, l'opérabilité globale (Φ_G , convolution de l'opérabilité et de la valeur courante, ex. $\Phi_{Z1} * \gamma_{Z1}$) de chaque zone peut être obtenue (Φ_{GZ1} , Φ_{GZ2} , Φ_{GZ3}). Enfin, suivant les opérabilités considérées par le système (ex. seulement l'anticipation et la réponse) les tableaux définis précédemment peuvent être utilisés non plus pour des

priorités entre des groupes mais entre des zones. A titre d'exemple, si le système ne considère que la résilience sur l'anticipation (zone 1) et la réponse (zone 2), que la zone 1 est prioritaire par rapport à la zone 2 et que $\Phi_{GZ1} < \Phi_{GZ2}$ alors le tableau 13 du cas 1 peut être utilisé.

2. L'opérabilité est calculée pour chaque zone en utilisant les opérateurs précédents (Φ_{Z1} , Φ_{Z2} , Φ_{Z3}). La valeur courante de la résilience (γ) est calculée de manière globale (γ_R) à l'aide des indicateurs issus de la littérature (Zobel, 2011). En utilisant, les tableaux précédents il est possible de calculer une opérabilité globale de zone résultant de celles obtenues pour chaque zone (Φ_{Z123}). A titre d'exemple, si le système considère la résilience sur les 3 zones, le tableau 16 peut être utilisée selon le cas considéré (et les priorités entre zones dans ce cas). Le tableau suivant peut alors être utilisé directement pour trouver l'opérabilité globale du système (Φ_G , convolution de l'opérabilité globale de zone et de la valeur courante, ex. $\Phi_{Z123} * \gamma_R$).

Tableau 20. Evaluation de l'opérabilité globale

$\Phi \backslash \gamma$		γ				
		VL	L	N	H	VH
Φ	VL	VL	VL	L	L	N/L
	L	VL	VL	N/L	N	H
	N	VL	L	N	H	VH
	H	L	N	N/H	VH	VH
	VH	N/H	H	H	VH	VH

5. Conclusion

Nous venons, dans ce chapitre, de présenter une méthode pour évaluer la résilience en analysant l'écosystème d'« -ilities » et plus précisément la relation qui existe entre la résilience et les autres. Cette méthode s'appuie sur les cartographies établies au chapitre précédent et la définition d'un ensemble de paramètres et d'opérateurs pour obtenir, au final, une valeur de résilience selon sa propre dynamique. Cette valeur interprétée au moyen de la courbe de résilience doit permettre à des acteurs de connaître la capacité de résilience par rapport à un évènement.

La méthode que nous proposons se veut complémentaire des méthodes d'évaluation existantes. En effet, la valeur de résilience obtenue peut être liée aux valeurs des autres méthodes pour obtenir une valeur globale si nécessaire.

Notre méthode intègre la dimension de capacités fournies par d'autres exigences à la résilience et sans lesquelles elle ne peut être réalisée correctement. Cela représente une vision nouvelle de l'évaluation de la résilience. Ainsi une valeur de résilience obtenue avec une méthode classique peut très bien être modulée par celle obtenue avec l'opérabilité. C'est le cas par exemple si le système requiert l'interopérabilité pour répondre à un événement mais que celle-ci est absente. La résilience peut être évaluée initialement comme correcte alors qu'elle ne sera pas (ou peu) effective par une analyse de l'opérabilité.

Afin de montrer l'applicabilité et l'utilisabilité de notre méthode, le chapitre suivant présente un cas applicatif.

Chapitre 5

Application de l'approche de l'évaluation de la résilience

Résumé

Ce chapitre présente une application de la méthode d'évaluation de la résilience. Cette application concerne la résilience d'un système incendie constitué d'un ensemble de sous-systèmes. Suite à la présentation de ce système et de la nécessité de maîtriser la résilience, nous évaluons sa résilience. Nous déterminons dans un premier temps les cartographies des relations et de la dynamique propre à ce système. Nous évaluons ensuite la résilience et interprétons les résultats obtenus.

Table des matières du chapitre 5

1. Introduction	107
2. Présentation du cas d'étude	107
2.1. Présentation générale	107
3. Application du modèle d'évaluation de la résilience	110
3.1. Nécessité d'évaluer et maîtriser la résilience pour le système de lutte incendie	110
3.2. Cartographie de la résilience	110
3.3. Exigences majeures pour la résilience du système de lutte incendie	111
4. Evaluation de la résilience du système de lutte incendie (opérabilité)	113
4.1. Existence (σ)	113
4.2. Etat courant (γ)	114
4.3. Impact (ω)	116
4.4. Priorité (\triangleright)	117
4.5. Evaluation de l'opérabilité de chaque « -ilities » sur la résilience	118
4.6. Evaluation de l'opérabilité de plusieurs sources sur la résilience	118
4.6.1. Évaluation au sein d'un groupe (ex. is1\trianglerightis2)	118
4.6.2 Evaluation de l'opérabilité entre différents groupes	120
A - Evaluation de l'opérabilité pour la zone d'anticipation	120
B - Evaluation de l'opérabilité pour la zone de réponse	121
C - Evaluation de l'opérabilité pour la zone de rétablissement	121
5. Interprétation	122
5.1. Anticipation	122
5.2. Réponse	123
5.3. Rétablissement	124
6. Conclusion	125

1. Introduction

Pour montrer l'applicabilité et l'intérêt de notre méthode d'évaluation de la résilience, nous choisissons de nous appuyer partiellement sur le challenge proposé par l'INCOSE en 2012 (INCOSE, 2012b). Ce cas d'application présente un pays qui dispose d'un système de lutte contre les incendies et qui souhaite l'améliorer. Ce système regroupe un ensemble de sous-systèmes qui collaborent dans la lutte contre des feux de forêt. Dans ce contexte, nous allons évaluer la résilience de ce système pour - en fonction des résultats obtenus pour les différentes phases de la résilience – lui permettre de connaître son niveau actuel et l'améliorer si nécessaire.

Nous présentons dans un premier temps le cas d'étude et plus particulièrement le système de lutte contre les incendies ainsi que la nécessité de développer (et donc pour cela de mesurer) la résilience. Nous appliquons ensuite notre méthode d'évaluation. Nous développons tout d'abord les cartographies définies au chapitre trois pour mettre en évidence les exigences non fonctionnelles qui participent à la résilience de ce système. Nous utilisons ensuite les concepts de notre méthode d'évaluation développés au chapitre 4 pour fournir le niveau de résilience du système. Enfin, nous interprétons les résultats de notre évaluation pour guider les acteurs du système dans le cadre de l'amélioration de la résilience.

2. Présentation du cas d'étude

2.1. Présentation générale

« Forestia » est un pays qui souhaite améliorer l'efficacité de ses capacités à lutter contre les incendies. Son organisation actuelle se compose de :

- 11 centres d'opération départementaux (DOC) pour gérer, commander et contrôler les ressources (sapeurs-pompiers, bombardiers d'eau...);
- 1 centre de coordination et de réponse (PERCC) qui coordonne l'ensemble des centres d'opération ;
- Détecteurs de feu qui détectent les incendies et communiquent avec les centres départementaux et le centre coordination ;
- 1 poste de commandement mobile (MHQ) au plus près des incendies qui renseigne sur l'évolution du feu, met en œuvre les tactiques de lutte contre le feu et coordonne les moyens aériens et terrestres ;
- 1 centre de commandement des opérations (OCC) qui informe le poste de commandement mobile de l'évolution de la situation et le centre d'opération sur les opérations en cours ;
- L'officier air qui établit le plan de coordination des moyens aériens ;
- Les squads qui évacuent les personnes et luttent contre le feu sur terre ;

- L'équipe météo qui collecte et communique les données du service météo ;
- Les bombardiers d'eau qui signalent les largages au poste de commandement et informent l'officier air sur l'environnement.

La coordination, synchronisation, interaction et combinaison des activités des différents sous-systèmes doit aboutir à une maîtrise des incendies en termes d'identification, d'atténuation, de réponse, d'extinction et de suivi. Ainsi, on distingue 3 axes majeurs pour la lutte incendie que le système se doit de maîtriser :

1. Anticiper en détectant au plus tôt les incendies au travers des moyens de surveillance tels que les détecteurs, les squads ou encore les moyens aériens.
2. Le temps de réponse (réactivité) en cas de feu ainsi que la capacité à répondre efficacement avec une optimisation des ressources internes ou éventuellement externes face à une situation non maîtrisée (adaptabilité).
3. Le maintien ou le retour en condition opérationnelle de ses moyens matériels et humains dans des temps définis pour faire face à de nouveaux incendies particulièrement dans la période estivale ou le risque de départ de feu est accru.

L'ensemble de ces points doit permettre au système de lutte incendie de faire face aux risques d'incendies et de situations critiques selon le code suivant :

- Vert : le risque d'incendie est faible pour la période (hiver). La propagation est limitée dans le temps et dans l'espace. Les feux sont majoritairement d'intensité faible à modérée. Exceptionnellement, selon l'état des sols résultant de sécheresses dans la période estivale, les feux peuvent être d'intensité forte.
- Ambre : le risque d'incendie est élevé pour la période (été). La propagation est rapide et peut s'étendre sur de larges espaces. Le risque de multiplication des événements est également important. Les feux sont majoritairement d'intensité forte et peuvent être dans certains cas d'intensité exceptionnelle.
- Rouge : l'incendie est en cours et des événements avec des intensités élevées apparaissent. De même, la combinaison de plusieurs événements peut être constatée (vent, présence d'habitations...). Les feux peuvent être d'intensité extraordinaire comme on a pu le constater ces dernières années dans l'état de Californie (USA), en Grèce ou encore au Portugal.

L'ensemble des moyens présentés précédemment forme le système de lutte contre les incendies. La figure suivante montre ces différents sous-systèmes ainsi que leurs interrelations.

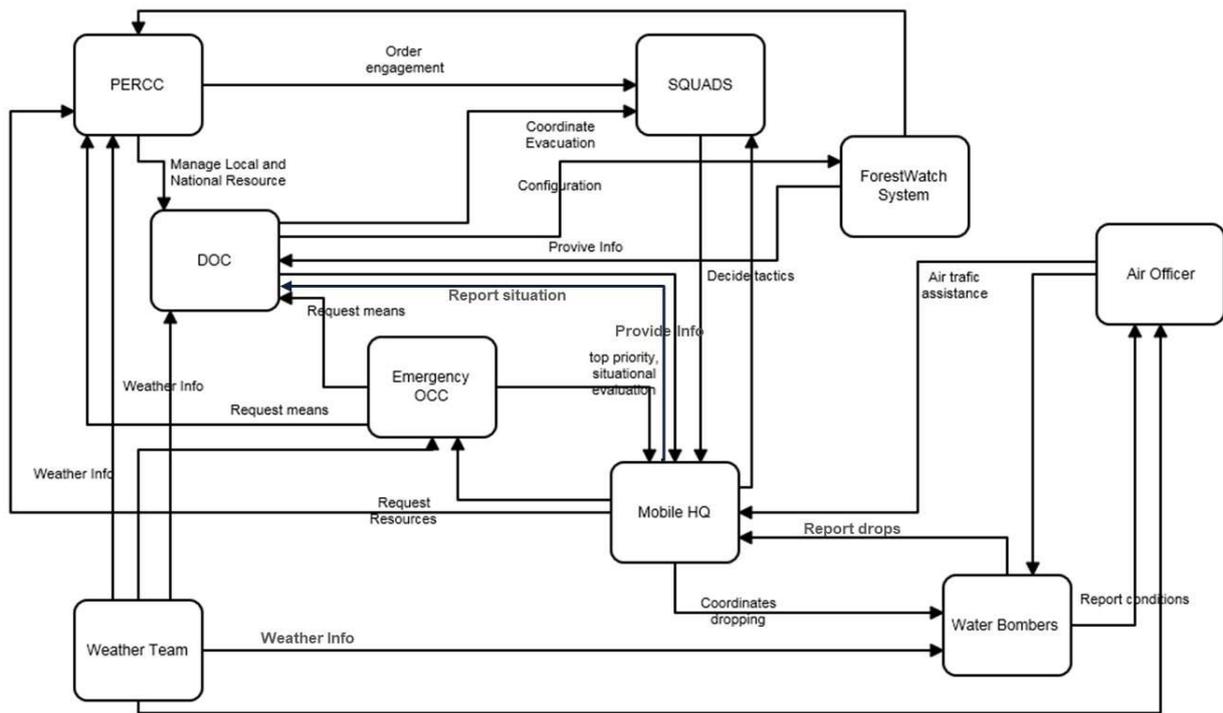


Figure 40. Modèle global du système incendie (Autran, 2008)

Afin de simplifier la compréhension de notre cas d'étude nous appliquons - dans les prochaines sections- notre méthode d'évaluation de la résilience sur les trois sous-systèmes que sont le centre des opérations départemental (DOC), le poste de commandement mobile (Mobile HQ) et les détecteurs de feux. Ces trois sous-systèmes sont choisis pour notre exemple car ils participent à la résilience du système sur toutes les zones de sa dynamique (ex. les détecteurs participent à la phase d'anticipation, le MHQ participe à toutes les phases). Bien que l'application soit simplifiée pour des raisons de compréhension, le principe reste le même si on souhaite évaluer la résilience en considérant l'ensemble des sous-systèmes appartenant au système incendie.

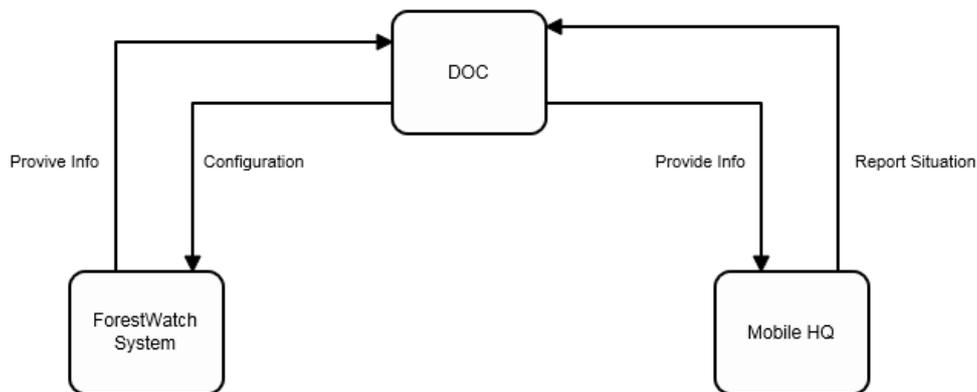


Figure 41. Modèle simplifié du système incendie pour l'évaluation de la résilience

Ainsi, nous présentons dans un premier temps les motivations pour évaluer la résilience sur ce type de système. Nous définissons ensuite la cartographie des relations entre la résilience et

les autres exigences qui sont intéressantes pour augmenter la capacité de résilience de ce système. Enfin, nous utilisons notre méthode d'évaluation pour fournir un niveau de résilience que nous interprétons dans le contexte de la lutte contre les incendies.

3. Application du modèle d'évaluation de la résilience

3.1. Nécessité d'évaluer et maîtriser la résilience pour le système de lutte incendie

Comme nous l'avons exprimé tout au long de ce manuscrit, la résilience est une exigence importante et indispensable pour des systèmes qui doivent anticiper des événements prévus (ou imprévus), continuer à fournir leur service en diminuant les conséquences des événements et, enfin, revenir à un état de fonctionnement qui permet de fournir leur service au niveau d'avant l'événement ou du moins, à un niveau acceptable. La maîtrise de ces trois composantes est importante pour des systèmes incendie. En effet, sans une capacité à prévenir un incendie assez tôt, ce dernier peut prendre de l'ampleur rendant difficile une réponse efficace voire tendre vers une réponse qui n'a pas d'effet. De la même manière, si un ensemble de moyens humains ou matériels est mis hors d'état de fonctionner (ou dans un état de fonctionnement dégradé) suite à un déploiement sur un incendie, le non rétablissement à un état de fonctionnement acceptable et dans un temps maîtrisé peut être critique si un autre incendie vient à être identifié. Il est donc nécessaire pour ce type de système d'être résilient sur les trois phases de sa dynamique. Pour chacune de ces phases un ensemble de propriétés vont être convoquées par la résilience pour être efficaces (ex. disponibilité des moyens humains et matériels pour la phase de réponse). Nous allons donc dans la suite évaluer la résilience pour qu'elle soit maîtrisée par le système.

3.2. Cartographie de la résilience

La cartographie de la résilience s'appuie sur l'identification et la définition des relations existantes entre la résilience et l'ensemble des autres « -ilites ». Dans le cadre de notre étude du système incendie, il s'agit d'identifier l'ensemble des « -ilites » qui vont participer à la résilience. Cette identification est réalisée en tenant compte des besoins du système pour anticiper, répondre et se rétablir dans le contexte d'incendies de forêt. La figure 43 rappelle la cartographie des relations à partir de laquelle nous allons extraire une cartographie spécifique au système incendie en considérant plus particulièrement les sous-systèmes détecteur, centre d'opération et poste de commandement mobile.

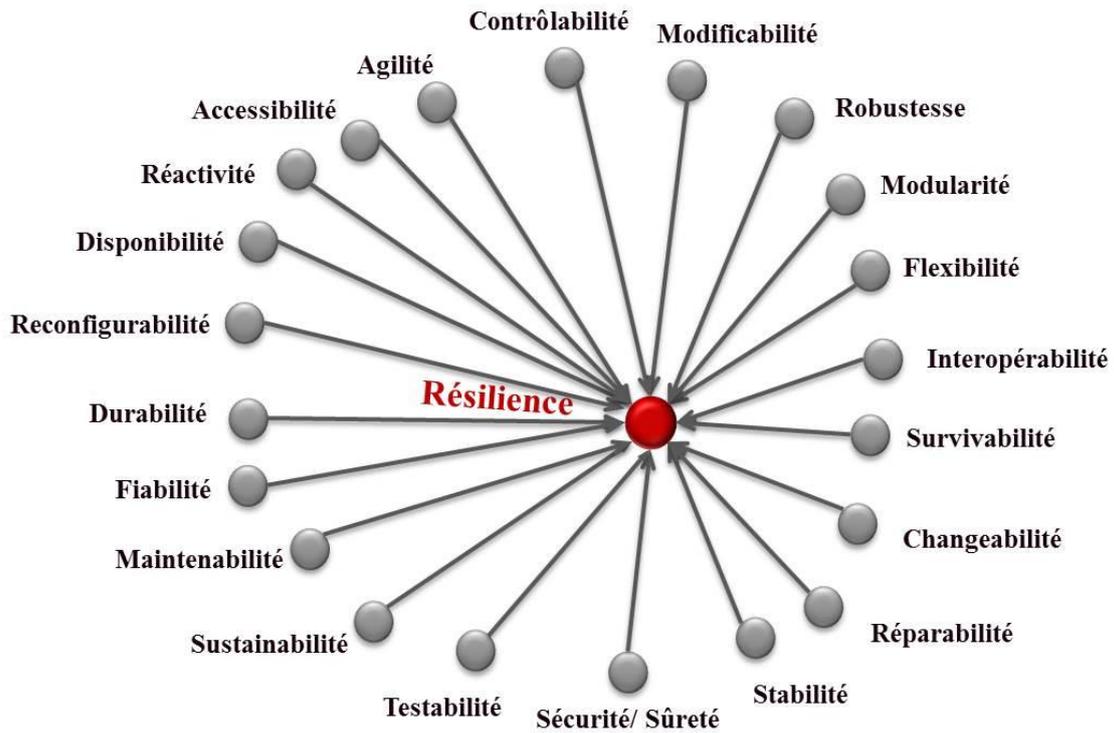


Figure 42. Cartographie des relations (Moradi, 2018a)

3.3. Exigences majeures pour la résilience du système de lutte incendie

A partir de cette cartographie des relations, nous identifions 8 exigences majeures qui participent à la résilience comme montré dans la figure suivante.

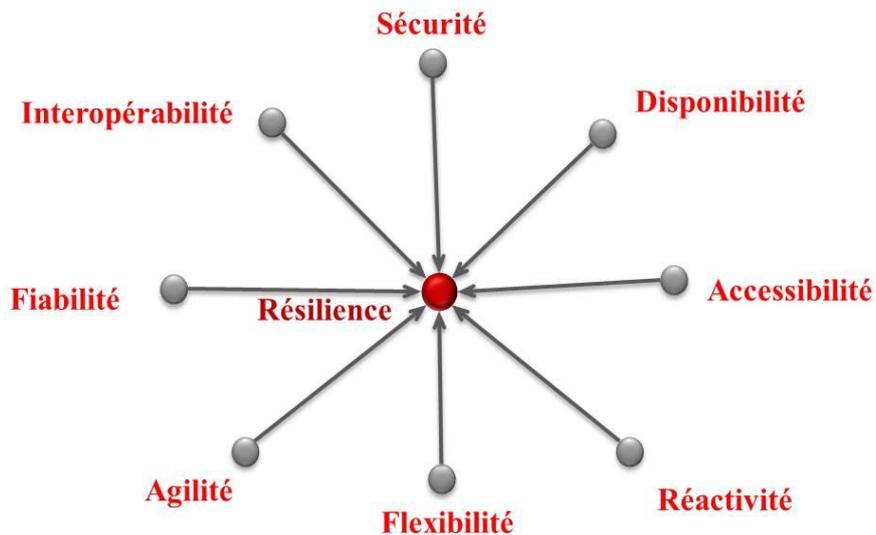


Figure 43. Cartographie des relations pour le système incendie

Ces exigences sont attendues sur les différentes phases de la résilience et par un ou plusieurs sous-système(s). Nous retrouvons ainsi :

- **La fiabilité.** Les détecteurs de feux doivent avoir un niveau de fiabilité élevé pour éviter de ne pas détecter des incendies ou encore de faire des faux positifs qui déclencheraient une réponse inutile alors qu'un feu pourrait apparaître ailleurs.
- **L'interopérabilité.** Cette capacité d'interaction est attendue de tous les sous-systèmes. Un défaut dans l'échange d'information (ex. manque d'information, information partielle, temps d'échange trop important) peut avoir des conséquences néfastes pour les hommes engagés sur le terrain dans la phase de réponse (ex. mauvaise orientation des équipes).
- **La disponibilité.** Les moyens matériels et humains constituant le système incendie doivent être disponibles quand ils sont sollicités pour lutter contre les incendies. C'est le cas des détecteurs de feux qui permettent d'identifier les départs de feux.
- **La sécurité.** Des mécanismes de sécurité doivent être mis en œuvre pour protéger les ressources qui font face aux feux. Le poste de commandement qui se trouve au plus près du feu traité doit disposer de moyens de sécurité pour préserver les ressources humaines et matérielles pour qu'il puisse continuer sa mission efficacement et sans risques de dommages majeurs (ex. système d'autoprotection par arceaux créant une bulle d'eau protectrice le temps d'évacuer).
- **L'accessibilité.** L'ensemble des moyens matériels et logiciel est accessible aux usagers. Cette exigence est attendue dans les phases d'anticipation et de réponse.
- **La réactivité.** Il s'agit ici de répondre rapidement et efficacement à une situation. Cette capacité est particulièrement attendue dans la phase de réponse. Ainsi le centre de commandement mobile doit être apte à établir une tactique de lutte rapidement pour traiter un incendie.
- **La flexibilité.** Le système incendie doit être en mesure de s'adapter aux évolutions possibles d'un incendie en cours de traitement. Il doit être en mesure de contrôler précisément les ressources engagées et s'adapter si cela devient nécessaire.
- **L'agilité.** Cette exigence est attendue dans la phase de rétablissement dans laquelle le système doit être capable éventuellement de modifier les processus établis précédemment pour la lutte incendie, de déployer de nouveaux matériels qui, à terme, améliorent la lutte incendie. Cette exigence est fortement liée au temps et doit être satisfaite dans des intervalles de temps définis.

En positionnant l'ensemble des « -ilities » précédentes sur le cycle de la résilience, nous obtenons la cartographie de la dynamique suivante. Certaines exigences sont positionnées sur différentes phases car elles sont attendues dans chacune (ex. la disponibilité).

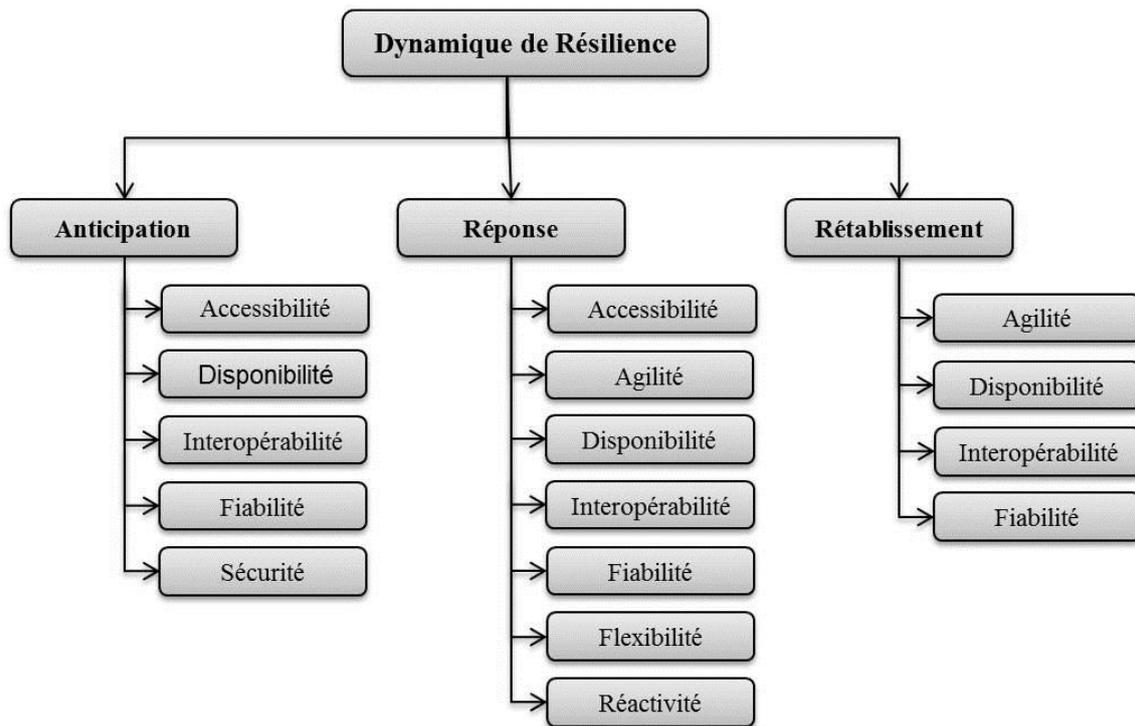


Figure 44. Cartographie de relation de la dynamique de résilience pour le système incendie

4. Evaluation de la résilience du système de lutte incendie (opérabilité)

L'évaluation de la résilience du système de lutte incendie s'appuie sur les cartographies établies précédemment. A partir de celles-ci, nous définissons l'ensemble des paramètres de notre modèle à savoir, l'existence (σ), l'état courant (γ), l'impact (ω) et les priorités (\triangleright). Nous utilisons ensuite les tableaux d'évaluation de la résilience pour obtenir une valeur pour chaque zone de la résilience (anticipation, réponse et rétablissement). Nous analysons ensuite ces résultats pour les interpréter dans le contexte de la lutte incendie. Rappelons dès maintenant que nous évaluons la résilience du système lutte incendie au travers de trois de ses sous-systèmes : les détecteurs, le poste de commandement mobile et le centre d'opération.

4.1. Existence (σ)

L'existence traduit la sollicitation d'une exigence par le système pour participer à la résilience. La cartographie définie précédemment a établi l'ensemble de ces exigences au nombre de 8 : disponibilité, fiabilité, interopérabilité, sécurité, flexibilité, agilité, réactivité et accessibilité. Chacune de ces exigences peut être attendue de sous-systèmes différents (ex. disponibilité) et/ou sur différentes phases de la résilience (ex. fiabilité). Le tableau suivant présente en détail l'existence et le positionnement des « -ilities » sur le cycle de vie de la résilience. Ces dernières seront utilisées pour le calcul de la résilience dans chaque zone.

Tableau 21. Existence de « -ilities » via 3 sous-systèmes selon le cycle de vie de la résilience

Systeme	Sous-Systèmes	Anticipation	Réponse	Rétablissement
lutte incendie	<i>Détecteur de feu</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Disponibilité • Interopérabilité • Fiabilité • Sécurité 		
	<i>Poste commandement mobile</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Disponibilité 	<ul style="list-style-type: none"> • Accessibilité • Agilité • Disponibilité • Interopérabilité • Fiabilité • Réactivité 	<ul style="list-style-type: none"> • Agilité • Disponibilité • Interopérabilité • Fiabilité
	<i>Centre d'opération</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Accessibilité • Interopérabilité • Fiabilité • Sécurité 	<ul style="list-style-type: none"> • Interopérabilité • Flexibilité 	<ul style="list-style-type: none"> • Interopérabilité

4.2. Etat courant (γ)

L'état courant représente la valeur de chaque « -ility » obtenue par l'utilisation des indicateurs classiques (ex. taux de disponibilité). Dans notre cas, nous avons vu avec l'existence que différents sous-systèmes sont concernés par la même « -ility » avec la possibilité d'avoir des valeurs différentes d'état courant. Ainsi, l'interopérabilité est attendue du détecteur de feu et du centre d'opération pendant la phase d'anticipation. Les deux valeurs courantes obtenues peuvent être différentes, ce peut être le cas par exemple pour l'interopérabilité entre ces deux éléments et leur capacité à échanger de l'information. Dans ce cas de figure nous retiendrons la valeur courante la plus faible de l'« -ility » concernée. Ce choix du cas le plus pessimiste rejoint le cas que nous avons présenté précédemment pour le calcul d'opérabilité entre 3 groupes de priorités (cf. section 3.4.2.3, Chapitre 4). Le tableau suivant présente l'état courant des « -ilities » convoquées pour la résilience du système de lutte incendie.

Tableau 22. Evaluation de l'état courant des « -ilities »

« -lity »	Evaluation état courant	Valeur
1. Accessibilité	L'accessibilité est attendue du poste de commandement mobile et des DOC. Dans le premier cas l'accessibilité est haute (H) et neutre (N) dans le deuxième cas. Nous conservons donc l'accessibilité du poste de DOC pour l'évaluation de la résilience.	N
2. Agilité	L'agilité demandée pour le poste de commandement mobile est haute (H). En effet ce sous-système adapte ses processus rapidement notamment après le traitement d'un évènement. De la même manière, il analyse les différents équipements suite aux retours terrains pour améliorer la réponse.	H
3. Disponibilité	La disponibilité est attendue des détecteurs et également du poste de commandement mobile. Dans le premier cas la disponibilité est très haute (VH) et haute (H) dans le deuxième cas. Nous conservons donc la disponibilité du poste de commandement mobile pour l'évaluation de la résilience.	H
4. Interopérabilité	Les interactions entre les différents sous-systèmes en termes d'échange et d'exploitation des informations sont bonnes. L'évaluation des temps d'interopérabilité ou encore de la qualité d'interopérabilité (ex. entre le centre de commandement mobile et le centre des opérations) sont dans les limites qui ne pénalisent pas la réalisation de la mission. La valeur courante de l'interopérabilité est donc haute (H).	H
5. Fiabilité	Le système de lutte incendie exécute de manière cohérente la mission prévue, à la demande et sans dégradations ni défaillances de ses équipements au-delà de ce qui est exigé.	H
6. Flexibilité	Une fois les différents sous-systèmes engagé, dans la lutte incendie, il a été constaté à plusieurs reprises des difficultés – pour le centre des opérations - pour	L

	s'adapter (en termes de ressources notamment) à une évolution du feu pourtant identifiée dans des scénarios de lutte. La valeur courante de la flexibilité est donc faible (L).	
7. Réactivité	Le système de lutte incendie est opérationnel dans les limites de temps fixés par les décideurs pour intervenir sur un feu de forêt. Le niveau de réactivité est évalué à la suite d'exercice et noté comme bon. La valeur courante est donc évaluée à haute (H).	H
8. Sécurité	Les équipements de sécurité des équipements, des personnes et les procédures sont conformes aux standards de la lutte incendie. Les équipements sont maintenus et remplacés si nécessaire (après mission ou après évolution en termes de sécurité). La valeur courante de la sécurité est haute (H).	H

4.3. Impact (ω)

L'impact représente le degré de la variation de la résilience sous l'influence d'« -ilities » sources. Le tableau suivant présente l'impact des « -ilities » sur la capacité résilience du système de lutte incendie. Sans détailler l'impact de chacune des exigences, l'interopérabilité – par exemple – des détecteurs de feux est une capacité importante qui impacte fortement la résilience du système. En effet, cette dernière fait varier fortement (High – H) la résilience du système dans le sens positif si elle est présente ou bien négatif dans le cas contraire dans les phases d'anticipation et de réponse. En revanche son impact est limité (neutre – N) dans la phase de rétablissement. De la même manière, l'agilité du poste de commandement mobile impacte fortement la résilience dans la phase de réponse quand cet impact est plus limité dans la zone de rétablissement. Le tableau 23 présente l'ensemble des impacts des « -ilities » sur la résilience.

Tableau 23. Table d'impact des « -ilities » sur la résilience

« -Iities »	Impact		
	Anticipation	Réponse	Rétablissement
1. Accessibilité	H	H	-
2. Agilité	-	H	N
3. Disponibilité	H	H	H
4. Interopérabilité	H	H	N
5. Fiabilité	H	N	H
6. Flexibilité	-	L	-
7. Réactivité	-	H	L
8. Sécurité	H	-	-

4.4. Priorité (▷)

La priorité représente si une exigence est plus ou moins essentielle pour la résilience par rapport à une autre. Cette notion peut varier d'un système à l'autre, sachant que certaines exigences ont un niveau de priorité pour la résilience qui est identique quel que soit le système considéré (ex. sécurité). Dans le système de lutte incendie la fiabilité et la disponibilité sont par exemple de priorité identique dans la zone d'anticipation. Ce positionnement est logique puisque ces deux exigences participent au bon fonctionnement dans le temps des éléments du système de lutte incendie. En revanche si la disponibilité reste prioritaire dans la zone de rétablissement (ex. moyens de maintenance disponibles, matériel apte à revenir rapidement en ligne) la fiabilité le sera un peu moins pour cette phase. Le tableau suivant présente l'ensemble des priorités entre « -ilities » sur les trois zones de la résilience.

Tableau 24. Table des priorités des trois sous-systèmes

Priorité	Anticipation	Réponse	Rétablissement
Groupe 1	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Disponibilité</i> • <i>Interopérabilité</i> • <i>Fiabilité</i> • <i>Sécurité</i> 	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Accessibilité</i> • <i>Agilité</i> • <i>Interopérabilité</i> • <i>Disponibilité</i> • <i>Fiabilité</i> • <i>Réactivité</i> 	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Disponibilité</i> • <i>Interopérabilité</i>
Groupe 2	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Accessibilité</i> 	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Flexibilité</i> 	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Fiabilité</i>
Groupe 3			<ul style="list-style-type: none"> • <i>Agilité</i>

A partir de la définition des paramètres précédents (existence, valeur courante, impact et priorité) nous appliquons les mécanismes de notre modèle d'évaluation pour calculer la résilience du système incendie.

4.5. Evaluation de l'opérabilité de chaque « -ilities » sur la résilience

Il s'agit ici d'évaluer dans un premier temps l'ensemble des opérabilités de chaque exigence sur la résilience. Cette opérabilité est le résultat du produit de convolution entre la valeur courante produite par la source ainsi que son impact sur la résilience. A partir du tableau d'opérabilité défini à la section (3.4.1, Chapitre 4), le tableau suivant présente les résultats obtenus pour le calcul d'opérabilité des exigences attendues par le système incendie pour sa résilience. A titre d'exemple, la convolution de la valeur courante de la disponibilité (H) pour un impact fort (H) sur toutes les zones de la résilience donne une opérabilité très haute (VH) pour toutes les zones de la résilience.

Tableau 25. Tableau d'opérabilité résultant de l'influence de chaque « -ility »

γ_{is} \ $\omega_{is \rightarrow ic}$	Φ_{Z1}	Φ_{Z2}	Φ_{Z2}
Accessibilité	N	N	-
Agilité	-	VH	H
Disponibilité	VH	VH	VH
Interopérabilité	VH	VH	H
Fiabilité	VH	N	N
Flexibilité	-	N	-
Réactivité	-	VH	-
Sécurité	VH	-	-

4.6. Evaluation de l'opérabilité de plusieurs sources sur la résilience

4.6.1. - Evaluation au sein d'un groupe (ex. $is1 \triangleright is2$)

L'évaluation de l'opérabilité au sein d'un même groupe de priorités (priorités identiques) retient la valeur minimale sur l'ensemble des opérabilités calculées précédemment ($\text{Min}(\Phi_1, \dots, \Phi_n)$). Les tableaux suivants présentent les calculs d'opérabilités pour chaque groupe de priorités et pour chaque zone de la dynamique de la résilience.

Tableau 26. Evaluation de l'opérabilité au sein d'un même groupe pour la zone d'anticipation

Priorité	Zone1	Opérabilités	Opérabilité zone 1 (Φ_{Z1})
Groupe 1	Disponibilité Interopérabilité Fiabilité Sécurité	$\Phi_1 = \text{VH}$ $\Phi_2 = \text{VH}$ $\Phi_3 = \text{VH}$ $\Phi_4 = \text{VH}$	VH
Groupe 2	Accessibilité	$\Phi = \text{N}$	N
Groupe 3	-	-	-

Tableau 27. Evaluation de l'opérabilité au sein d'un même groupe pour la zone de réponse

Priorité	Zone 2	Opérabilités	Opérabilité zone 2 (Φ_{Z2})
Groupe 1	Accessibilité Agilité Interopérabilité Disponibilité Fiabilité Réactivité	$\Phi_1 = \text{N}$ $\Phi_2 = \text{VH}$ $\Phi_3 = \text{VH}$ $\Phi_4 = \text{VH}$ $\Phi_5 = \text{H}$ $\Phi_6 = \text{VH}$	N
Groupe 2	Flexibilité	$\Phi = \text{N}$	N
Groupe 3	-	-	-

Tableau 28. Evaluation de l'opérabilité au sein d'un même groupe pour la zone de rétablissement

Priorité	Zone 3	Opérabilités	Opérabilité zone 3 (Φ_{Z3})
Groupe 1	Disponibilité Interopérabilité	$\Phi_1 = \text{VH}$ $\Phi_2 = \text{H}$	H
Groupe 2	Fiabilité	$\Phi = \text{H}$	VH
Groupe 3	Agilité	$\Phi = \text{H}$	H

Le tableau suivant synthétise les calculs d'opérabilités dans chaque groupe pour l'ensemble des zones.

Tableau 29. Evaluation de l'opérabilité pour toutes les zones

Priorité	Φ_{Z1}	Φ_{Z2}	Φ_{Z3}
Groupe 1	VH	N	H
Groupe 2	N	N	VH
Groupe 3	-	-	H

A partir de ces évaluations nous allons calculer l'opérabilité entre les différents groupes pour chaque zone.

4.6.2 Evaluation de l'opérabilité entre différents groupes

A - Evaluation de l'opérabilité pour la zone d'anticipation

Dans ce cas, l'évaluation concerne deux groupes de priorités (groupe 1 et 2) et la valeur d'opérabilité du groupe 1 est supérieure à celle du groupe 2. Nous nous retrouvons dans le cas numéro deux à savoir : *valeur d'opérabilité de l'« -ility » prioritaire supérieure à l'ility secondaire* : $\Phi_1 > \Phi_2$. Ce type de cas nécessite une analyse de la précision de la priorité (haute, égale, basse). Dans ce cas, les « -ilities » du groupe 1 sont de priorité haute (H) par rapport à celle du groupe 2 : $\Phi_1 \triangleright^H \Phi_2$. En utilisant le tableau de calcul d'opérabilité pour ce cas, nous obtenons une valeur d'opérabilité très haute (VH) pour la zone d'anticipation (cf. tableau ci-dessous).

Tableau 30. Evaluation de l'opérabilité pour la zone d'anticipation

$\Phi_1 \triangleright^H \Phi_2$		Φ_2				
		VL	L	N	H	VH
Φ_1	VL					
	L	L				
	N	L	N	N		
	H	N	N	H		
	VH	H	H	VH	VH	

B - Evaluation de l'opérabilité pour la zone de réponse

Dans ce cas, l'évaluation concerne toujours deux groupes de priorités (groupe 1 et groupe 2) et la valeur d'opérabilité du groupe 1 est égale à celle du groupe 2. Nous nous positionnons ici dans le cas numéro 1 à savoir : *valeur d'opérabilité de l'« -ility » prioritaire inférieure à l'« -ility » secondaire* : $\Phi_1 < \Phi_2$. Ce type de cas ne nécessite pas d'analyse particulière car c'est la valeur de l'« ility » prioritaire qui est retenue. Dans le cas de l'égalité, cela ne change rien et nous retiendrons également la valeur de l'« ility » prioritaire. En utilisant le tableau de calcul d'opérabilité pour ce cas, nous obtenons une valeur d'opérabilité moyenne (N) pour la zone de réponse (cf. tableau ci-dessous).

Tableau 31. Evaluation de l'opérabilité pour la zone de réponse

		Φ_2				
		VL	L	N	H	VH
Φ_1	VL	VL	VL	VL	VL	VL
	L		L	L	L	L
	N			N	N	N
	H				H	H
	VH					VH

C - Evaluation de l'opérabilité pour la zone de rétablissement

Dans ce cas, l'évaluation concerne trois groupes de priorités (groupe 1, 2 et 3) et la valeur d'opérabilité du groupe 1 est inférieure à celle du groupe 2, elle-même supérieure à celle du groupe 3. Selon le tableau que nous avons défini, nous pouvons analyser deux cas. Cependant la valeur d'opérabilité du groupe 1 étant égale celle du groupe 3 et celle du groupe 1 inférieure au groupe 2, nous retenons alors directement la valeur du groupe 1, prioritaire par rapport aux deux autres groupes.

Tableau 32. Evaluation de l'opérabilité pour la zone rétablissement

Cas		Evaluation de la résilience	
$\Phi_{G1} < \Phi_2$	$\Phi_{G2} > \Phi_{G3}$	$\Phi_{G3} > \Phi_{G1}$	Φ_{G1}
$\Phi_{G1} < \Phi_{G2}$	$\Phi_{G2} > \Phi_3$	$\Phi_{G3} < \Phi_{G1}$	$\Phi_{G1} \nabla^H \Phi_{G3}$
$H < VH$	$VH > H$	H	H

Ainsi, nous obtenons l'ensemble des valeurs d'opérabilité (résilience) pour chaque zone, comme montré dans le tableau suivant.

Tableau 33. Evaluation de la résilience sur les zones

Φ		
Φ_{Z1}	Φ_{Z2}	Φ_{Z3}
VH	N	H

S'il le souhaite, l'utilisateur peut obtenir une valeur globale de la résilience en utilisant le tableau que nous avons fourni (tableau 20), la stratégie d'évaluation qu'il adopte. Nous choisissons de ne pas présenter ce calcul ici, n'ayant pas d'informations supplémentaires sur la stratégie qui peut être adoptée par le système incendie pour ce calcul.

5. Interprétation

5.1. Anticipation

La valeur d'opérabilité pour la zone d'anticipation est très haute (VH). Selon le tableau d'interprétation : « *Le système peut être en mesure de faire face à des événements perturbateurs d'intensité extraordinaire c'est-à-dire qui ne sont pas identifiés (ex. non occurrence passé de cet évènement) ou encore une combinaison d'évènements identifiés et d'intensité supérieure aux extrêmes connus. Il peut donc être capable de poursuivre sa mission le temps que des actions soit engagées pour revenir à un état non (ou moins) perturbé* ». Dans le cadre du système incendie, cela signifie que tant que l'intensité de l'évènement est inférieure à la valeur d'opérabilité, il peut être anticipé et le système incendie peut poursuivre sa mission dans des conditions normales à des niveaux de performances normales. Ainsi, le système peut anticiper des évènements dans la gamme de très faible intensité et connus jusqu'à des évènements extraordinaires. Dans le cadre du système incendie son niveau de résilience en termes de prévention/anticipation est très bon pour les feux catégorisés vert et ambre mais également rouge notamment dans le cas d'intensité de feux au-dessus de la normale ou encore de combinaison d'évènements.

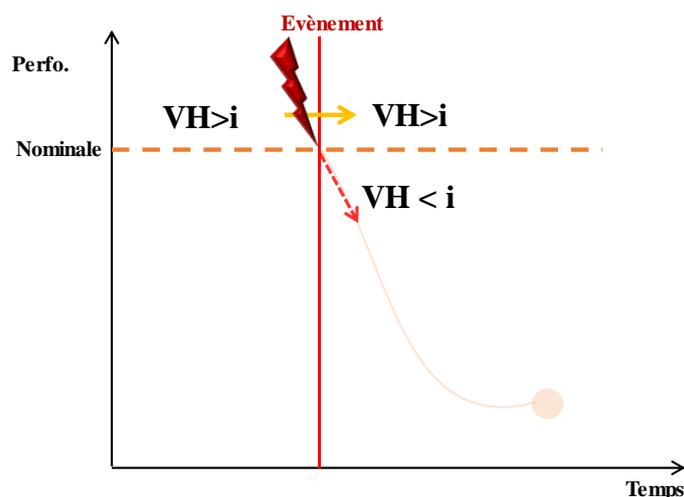


Figure 45. Interprétation de l'opérabilité pour la zone d'anticipation

5.2. Réponse

La valeur d'opérabilité pour la zone de réponse est Neutre (N). Selon le tableau d'interprétation : « *Le système est capable de répondre à des événements d'intensité maximale prévue. Si l'intensité de l'évènement se rapproche de la valeur de résilience, le système tendra vers le niveau de performance minimale acceptable.* ». Dans le cadre du système incendie, cela signifie que tant que l'intensité de l'évènement est inférieure à la valeur d'opérabilité, le système peut répondre à cet évènement et en diminuer les conséquences dans un temps défini et acceptable. Ainsi, le système peut répondre des évènements dans la gamme de très faible intensité et connus jusqu'à des évènements normaux c'est-à-dire des évènements auxquels il est confronté habituellement et d'intensité maximale prévue. Dans le cadre du système incendie son niveau de résilience en termes de réponse est normal pour les feux catégorisés vert et ambre. Toutefois, il peut rencontrer des difficultés dans le cas d'évènements catégorisés rouge (et supérieurs à son opérabilité en termes de réponse) et tout particulièrement dans le cas où des sur évènements viendraient s'ajouter à l'évènement initial. Il risquerait alors de ne pas répondre efficacement et de passer le seuil de performance minimale voire de tendre vers l'arrêt de la réponse.

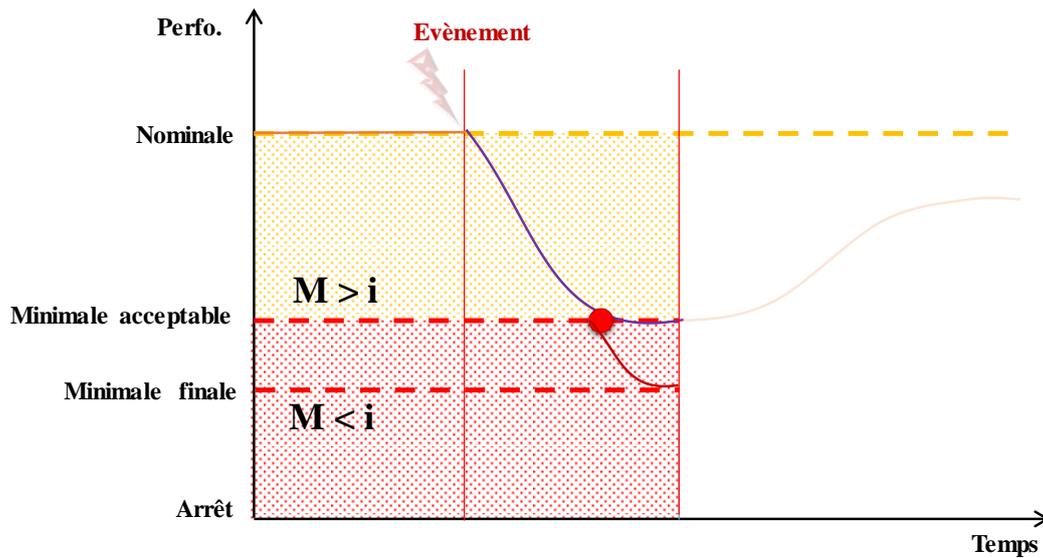


Figure 46. Interprétation de l'opérabilité pour la zone de réponse

5.3. Rétablissement

La valeur d'opérabilité pour la zone de rétablissement est haute (H). Selon le tableau d'interprétation : « *Le système est capable de se rétablir à un niveau de performance compris entre le niveau de performance acceptable et le niveau de performance nominal et dans un temps limité et défini* ». Dans le cadre du système incendie, cela signifie qu'il est capable de revenir à un niveau de performance (niveau de performance atteinte) situé entre le niveau de performance de retour acceptable et le niveau de performance nominale dans les temps qui sont définis.

Il sera donc opérationnel pour anticiper et répondre à d'autres évènements dans les délais fixés après études des occurrences de ces derniers selon qu'ils soient catégorisés vert ou ambre.

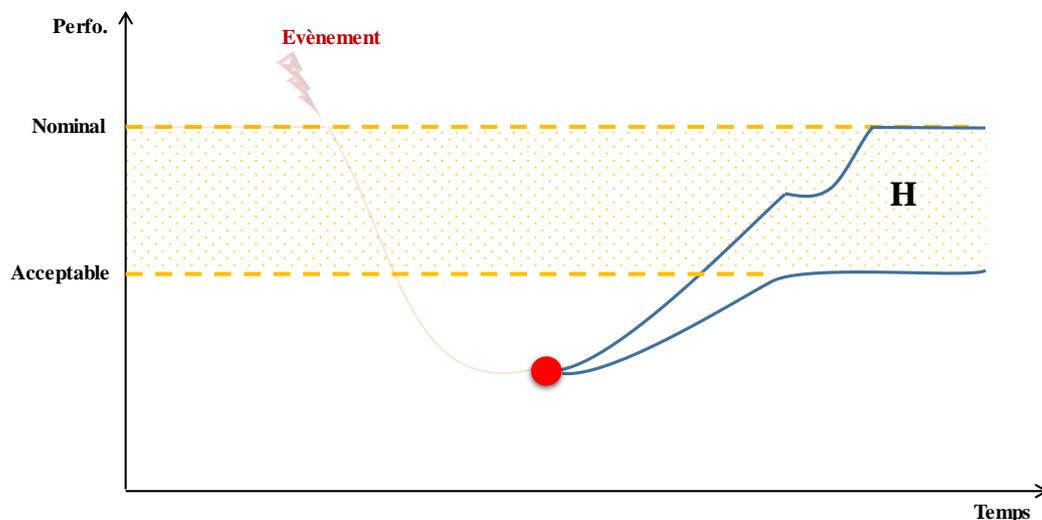


Figure 47. Interprétation de l'opérabilité pour la zone de rétablissement

6. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons appliqué notre méthode d'évaluation à un système confronté à des événements de type incendie. En analysant ce système selon ses sous-systèmes, l'intensité des événements auxquels il peut faire face et l'ensemble des outils de notre méthode (cartographie, opérabilité et interprétation), nous avons fourni un niveau de résilience de ce système selon les phases d'anticipation, de réponse et de rétablissement. Nous avons volontairement simplifié le système en sélectionnant et analysant la résilience selon un ensemble de sous-systèmes restreint et de « -ilities » convoquées pour cette résilience. L'ensemble de la méthode peut être appliqué à tout le système incendie et en considérant d'autres « -ilities » si elles sont identifiées comme participant à la résilience.

Conclusion, Limites et Perspectives

1. Conclusion

Notre travail de recherche s'est attaché à proposer une méthode d'évaluation de la résilience dans le contexte de l'analyse de l'écosystème d'« -lities ». Cette méthode se veut novatrice car l'ensemble des méthodes proposées actuellement se concentre classiquement sur l'analyse des performances d'un système à la suite d'un événement et au travers de la courbe de résilience. En revanche, elle se veut complémentaire de ses différentes méthodes en permettant d'avoir une vision plus fine basée non pas sur les performances mais sur l'analyse de la capacité de résilience à partir d'exigences qui peuvent la supporter. Ainsi, notre contribution se concentre sur deux points majeurs.

Dans un premier temps nous avons caractérisé la résilience suivant les relations qu'elle peut avoir avec les exigences appartenant à l'écosystème d'« -lities ». Nous avons, à travers une analyse des définitions issues de la littérature et des caractéristiques de la résilience, identifié l'existence de relations, défini la nature de ses relations et proposé enfin une **cartographie des relations** restreinte à la résilience et aux exigences avec lesquelles elle est liée. Pour aller plus loin, nous avons analysé le cycle de vie de la résilience selon ses caractéristiques d'anticipation, de réponse et de rétablissement et positionné les exigences en relation selon la (les) phase(s) dans la(es)quelle(s) elles peuvent être convoquées pour participer à la résilience. Cette deuxième analyse a abouti à la proposition d'une **cartographie de la dynamique de la résilience**.

Nous avons ensuite proposé une méthode d'évaluation basée sur les deux cartographies établies. Pour cela nous avons défini un ensemble de paramètres caractérisant les liens entre les différentes exigences en termes d'**existence**, d'**impact**, de **valeur courante** et de **priorités**. A partir de ces paramètres nous avons proposé un ensemble de mécanismes qualitatifs. Ces mécanismes sont mis en œuvre au travers de tableaux selon les exigences et leur relation avec la résilience et qui sont identifiées pour un système. Une fois ces mécanismes déployés, nous obtenons un niveau de résilience que nous appelons **opérabilité** et selon sa dynamique : l'anticipation, la réponse et le rétablissement. Ensuite, nous avons interprété ces différents résultats possibles de la résilience. Cette interprétation s'appuie sur la courbe de la résilience pour en faciliter la lecture et l'exploitation.

L'ensemble de notre méthode (cartographie et opérabilité) se veut en partie générique, simple dans son utilisation et facile dans son exploitation. En effet, elle peut être générique sur certains principes notamment pour ce qui concerne la cartographie des relations où les aspects d'existence, de nature ou encore d'orientation peuvent être utilisés pour caractériser d'autres exigences. En revanche, la cartographie de la dynamique reste propre à la résilience. De la même manière, les paramètres et les tableaux d'évaluation de l'opérabilité peuvent être utilisés pour d'autres exigences (à supposer qu'ils soient adaptés si nécessaire). L'interprétation quant à elle est également propre à la résilience. Notre méthode est simple dans son utilisation et son exploitation. Ce choix est volontaire depuis le début de notre recherche. En effet, la résilience est utilisée pour des systèmes qui peuvent faire face à des situations critiques et dans lesquels le temps (de réaction, de décision) est primordial.

Il nous est donc apparu primordial de développer notre méthode basée sur une approche qualitative et avec des mécanismes sous forme de tableaux rapidement lisibles et utilisables en comparaison à des méthodes plus formelles et quantitatives qui peuvent s'avérer plus difficilement exploitables sans un minimum de connaissances.

2. Limites et perspectives

Notre approche d'évaluation de la résilience peut être améliorée selon différents aspects à savoir :

1. Au niveau de la cartographie des relations, et plus loin de la méthode d'évaluation, nous avons considéré uniquement la relation d'influence. Nous avons cependant mis en évidence d'autres natures qui peuvent caractériser la relation (ex. substitution, compromis...). Ces différentes natures doivent être identifiées sur la cartographie pour pouvoir les exploiter par la suite dans le modèle d'évaluation et obtenir une évaluation plus fine et des actions d'amélioration plus précises. Cet axe passe par l'analyse de la littérature comme cela a été le cas pour l'influence et l'adaptation du modèle d'évaluation et d'interprétation.
2. Au niveau du modèle d'évaluation, nous avons considéré les relations directes. Une lecture du graphe initialement utilisé met en évidence un ensemble de boucle qui n'est pas intégré. On peut cependant postuler qu'il existe des mécanismes de propagation de valeurs à travers le graphe. Là encore, ces boucles de propagation doivent être identifiées et analysées pour être intégrées au modèle d'évaluation et obtenir un résultat plus fin.
3. Encore au niveau du graphe, nous avons considéré uniquement les relations entrantes (« ility » vers résilience). Il peut être intéressant de considérer les relations sortantes (résilience vers « -ility ») de l'exigence analysée. En effet, si on obtient une valeur de résilience et que des actions de correction sont engagées, il faut être conscient de l'impact que ces corrections peuvent avoir sur d'autres exigences et donc corriger en conséquence.
4. Enfin, nous n'avons pas développé de moyens techniques pour exploiter notre méthode d'évaluation. Notre vision de l'évaluation de la résilience étant nouvelle, nous nous sommes concentrées sur la définition des concepts, les principes et les indicateurs d'évaluation en priorité. Il sera donc nécessaire de développer les moyens logiciels pour permettre à des utilisateurs de construire leurs cartographies selon les spécificités de leur organisation et d'automatiser l'évaluation par la saisie des différents paramètres et le calcul de l'opérabilité.

Bibliographie

- Adger, W. N. (2003). Building resilience to promote sustainability. *IHDP Update*, 2(2003), 1-3.
- AFIS. (2009). Découvrir et comprendre l'Ingénierie Système. Association Française d'Ingénierie Système.
- Alliance, R. (2009). Key concepts. On line en: <http://www.resalliance.org/576.php>(24 de julio de 2009).
- Allenby, B., & Fink, J. (2005). Toward inherently secure and resilient societies. *Science*, 309(5737), 1034-1036.
- Alberts, D. S., & Hayes, R. E. (2007). Planning: complex endeavors. Assistant Secretary of Defense (C3I/Command Control Research Program) Washington DC.
- Allen, T. J., Moses, J., Hastings, D. E., Lloyd, S., Little, J. D., McGowan, D., & Whitney, D. (2001). ESD terms and definitions (version 12).
- ANSSI. (2017). Agence nationale de la sécurité des systèmes d'information <https://www.ssi.gouv.fr/actualite/lannee-2017-un-tournant-pour-la-securite-numerique-en-france/>
- Autran, F., Auzelle, J. P., Cattan, D., Garnier, J. L., Luzeaux, D., Mayer, F., ... & Ruault, J. R. (2008). Coupling component systems towards systems of systems. arXiv preprint arXiv:0805.3196.
- Avizienis, A., Laprie, J. C., & Randell, B. (2001). Fundamental concepts of dependability (pp. 7-12). University of Newcastle upon Tyne, Computing Science.
- Bordoloi, S. K., Cooper, W. W., & Matsuo, H. (1999). Flexibility, adaptability, and efficiency in manufacturing systems. *Production and Operations Management*, 8(2), 133-150.
- 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.
- Brunsdon, D., & Dalziell, E. (2005). Making organisations resilient: understanding the reality of the challenge.
- Butler, L., Morland, L., & Leskin, G. (2007). Psychological resilience in the face of terrorism. *Psychology of terrorism*, 400-417.
- Camarinha-Matos, L. M., Afsarmanesh, H., Galeano, N., & Molina, A. (2009). Collaborative networked organizations—Concepts and practice in manufacturing enterprises. *Computers & Industrial Engineering*, 57(1), 46-60.
- Caralli, R. A., Allen, J. H., Curtis, P. D., White, D. W., & Young, L. R. (2010). Improving operational resilience processes: The CERT resilience management model. In 2010 IEEE

- Second International Conference on Social Computing (pp. 1165-1170). IEEE.
- Cardoso, S. R., Barbosa-Póvoa, A. P., Relvas, S., & Novais, A. Q. (2015). Resilience metrics in the assessment of complex supply-chains performance operating under demand uncertainty. *Omega*, 56, 53-73.
- Chapman, J. (2009). Design for (emotional) durability. *Design Issues*, 25(4), 29-35.
- Chen, D., & Vernadat, F. (2004). Standards on enterprise integration and engineering—state of the art. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 17(3), 235-253.
- Chin, K. S., Yau, P. E., Wah, S. K., & Khiang, P. C. (2013). Framework for managing System-of-systems ilities. *DSTA HORIZONS*, 14.
- Cimellaro, G. P., Reinhorn, A. M., & Bruneau, M. (2010). Framework for analytical quantification of disaster resilience. *Engineering structures*, 32(11), 3639-3649.
- Clara-Villar Cerema, Territoires et ville, (2017). La résilience des territoires aux catastrophes.
- Clouqueur, M., & Grover, W. D. (2002). Availability analysis of span-restorable mesh networks. *IEEE journal on selected areas in communications*, 20(4), 810-821.
- Cox, Andrew, Fynnwin Prager, and Adam Rose. (2011). “Transportation Security and the Role of Resilience: A Foundation for Operational Metrics.” *Transport Policy* 18 (2). Elsevier: 307–17.
- Curt, C., Tacnet, J. M., & Simon, C. (2016). Résilience des infrastructures critiques: point de vue sur les approches actuelles. *Congrès Lambda Mu 20 de Maîtrise des Risques et de Sûreté de Fonctionnement*, 11-13 Octobre 2016, Saint Malo, France
- Cutter, S. L. (2013a). Building disaster resilience: steps toward sustainability. *Challenges in Sustainability*, 1(2), 72.
- Cutter, Susan L, Joseph A Ahearn, Bernard Amadei, Patrick Crawford, (2013b). “Disaster Resilience: A National Imperative.” *Environment: Science and Policy for Sustainable Development* 55 (2): 25–29. doi:10.1080/00139157.2013.768076.
- Daclin, N. (2017). FORMALISATION ET EVALUATION DES EXIGENCES NON FONCTIONNELLES POUR L'INGENIERIE DES SYSTEMES COLLABORATIFS (Doctoral dissertation, Université de Montpellier II).
- David, P. (2009). Contribution à l'analyse de sûreté de fonctionnement des systèmes complexes en phase de conception : application à l'évaluation des missions d'un réseau de capteurs de présence humaine (Doctoral dissertation, Université d'Orléans).

- DeWeck, O. L., Ross, A. M., & Rhodes, D. H. (2012). Investigating Relationships and Semantic Sets amongst System Lifecycle Properties (ilities). Third International Engineering Systems Symposium CESUN 2012, Delft University of Technology, 18-20 June 2012, (June), 18–20.
- DeWeck, O. L. (2011). Engineering Systems. 4 Life-Cycle Properties of Engineering Systems: The Iilities. In the epoch of great inventions and artifacts, Jun 16, 2011.
- Dinh, L. T., Pasman, H., Gao, X., & Mannan, M. S. (2012). Resilience engineering of industrial processes: principles and contributing factors. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 25(2), 233-241.
- DoD. (2011). *Systems Engineering Fundamentals*. Defense Acquisition University Press.
- Domptail, S., & Easdale, M. H. (2013). Managing socio-ecological systems to achieve sustainability: A study of resilience and robustness. *Environmental Policy and Governance*, 23(1), 30-45.
- Enjalbert, S., Vanderhaegen, F., Pichon, M., Ouedraogo, K. A., & Millot, P. (2011). Assessment of transportation system resilience. In *Human modelling in assisted transportation* (pp. 335-341). Springer, Milano.
- Eydieux, J. (2018, June). Valuation and Risk Management: Anticipation and Resilience. In *Third European Pragmatism Conference*.
- Farid, A. A., & Hranilovic, S. (2007). Outage capacity optimization for free-space optical links with pointing errors. *Journal of Lightwave technology*, 25(7), 1702-1710.
- Fiksel, J. (2003). Designing resilient, sustainable systems. *Environmental science & technology*, 37(23), 5330-5339.
- Flynn, S. E. (2008). America the resilient-defying terrorism and mitigating natural disasters. *Foreign Aff.*, 87, 2.
- Fricke, E., & Schulz, A. P. (2005). Design for changeability (DfC): Principles to enable changes in systems throughout their entire lifecycle. *Systems Engineering*, 8(4), no.90-103.
- Gargiulo, C., Tulisi, A., & Zucaro, F. (2016). Small green areas for energy saving: effects on different urban settlements.
- Gibson, C. A., & Tarrant, M. (2010). A'conceptual models' approach to organisational resilience. *Australian Journal of Emergency Management, The*, 25(2), 6.
- Gordon, S. H. (1978). U.S. Patent No. 4,130,751. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.

- Gribble, S. D. (2001). Robustness in complex systems. In Proceedings eighth workshop on hot topics in operating systems (pp. 21-26). IEEE.
- Haimes, Y. Y. (2009). On the Definition of Resilience in Systems. *Risk Analysis*, 29(4), 498–501. <https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.2009.01216.x>
- Haskins, C. (2007). *INCOSE Systems Engineering Handbook: A Guide for System Life Cycle Processes and Activities*. Incose.
- Heinen, T., Rimpau, C., & Wörn, A. (2008). Wandlungsfähigkeit als Ziel der Produktionssystemgestaltung. *Wandlungsfähige Produktionssysteme*. Garbsen: PZH Produktionstechnisches Zentrum, 19-32.
- 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.
- Hosseini, Seyedmohsen, Kash Barker, and Jose E. Ramirez-Marquez. 2016. 'A Review of Definitions and Measures of System Resilience'. *Reliability Engineering & System Safety* 145 (January):47–61. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2015.08.006>.
- Hollnagel, E. (2013). *Resilience engineering in practice: A guidebook*. Retrieved from <https://books.google.fr/books?hl=fr&lr=&id=1YHXCQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR13&d>
- Hollnagel, E. (2011). *RAG-The resilience analysis grid. Resilience engineering in practice: a guidebook*. Ashgate Publishing Limited, Farnham, Surrey, 275-296.
- Hollnagel, E., Woods, D. D., & Leveson, N. (2007). *Resilience engineering: Concepts and precepts*. Ashgate Publishing, Ltd
- Holling, C. S. (1973). Resilience and stability of ecological systems. *Annual review of ecology and systematics*, 4(1), 1-23.
- Holling, C. S. (1996). Engineering resilience versus ecological resilience. *Engineering within ecological constraints*, 31(1996), 32.
- Holling, Crawford S. (2001). "Understanding the Complexity of Economic, Ecological, and Social Systems." *Ecosystems* 4 (5). Springer: 390–405.
- INCOSE. (2012, a). *Systems Engineering Handbook—A guide for System life cycle processes and activities*, INCOSE Systems Engineering Handbook v.3.2.2 INCOSE TP 2003 002 03.2.2.
- INCOSE. (2012b). *INCOSE Challenge ToolVendor*, http://www.incose.org/symp2012/index.php?option=com_content&view=category&layout=blog&id=29&Itemid=31.

- ISO. (2015). *Systems and Software Engineering -- System Life Cycle Processes*. Geneva, Switzerland: ISO/IEC/IEEE 15288:2015.
- ISO/TC. (2009). *Advanced automation technologies and their applications — Framework for enterprise interoperability*
- ISO-15288, Pearce, P., & Hause, M. (2012). *oosem and model-based submarine design*.
- ISO/IEC. (1994). *Information Processing Systems, Open System Interconnection (OSI) Reference, Model, The Basic Model, ITU-T Rec. X.200, ISO/IEC JTC1/SC6*
- Jackson, S. (2016). *Evaluation of resilience principles for engineered systems* (Doctoral dissertation, PhD thesis, University of South Australia).
- Jackson, S., & Ferris, T. L. (2013). Resilience principles for engineered systems. *Systems Engineering*, 16(2), 152-164.
- Kahan, J. H., Allen, A. C., & George, J. K. (2009). An operational framework for resilience. *Journal of Homeland Security and Emergency Management*, 6(1).
- Kerbrat, O., Mognol, P., & Hascoët, J. Y. (2010). Manufacturability analysis to combine additive and subtractive processes. *Rapid Prototyping Journal*, 16(1), 63-72.
- Klein, R. J., Nicholls, R. J., & Thomalla, F. (2003). Resilience to natural hazards: How useful is this concept?. *Global environmental change part B: environmental hazards*, 5(1), 35-45.
- Koulou, A., El Hami, N., Hmina, N., Elmir, A., & Bounabat, B. (2016). A novel approach IMA of interoperability measurement. In *2016 4th IEEE International Colloquium on Information Science and Technology (CiSt)* (pp. 665-669). IEEE.
- Lauby, M. G., Bian, J. J., & Slone, A. D. (2012, July). NERC's risk assessment of reliability performance. In *2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting* (pp. 1-6). IEEE.
- Laprie, J. C. (2008, June). From dependability to resilience. In *38th IEEE/IFIP Int. Conf. On dependable systems and networks*(pp. G8-G9).
- Laprie, J. C. (1992). *Dependability: Basic concepts and terminology*. In *Dependability: Basic Concepts and Terminology* (pp. 3-245). Springer, Vienna.
- Larman, C. (2002). *Object-Oriented Analysis and Design. Applying UML and Patterns: An Introduction to Object-Oriented Analysis and Design and the Unified Process*, 10-11.
- LaRocca, S. (2014). *Modeling the reliability and robustness of critical infrastructure networks* (Doctoral dissertation, Johns Hopkins University).
- Larousse (2009), Compensation. Dans *Dictionnaire Larousse en ligne*,

<http://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/compenser/17642>.

- Lauby, M. G., Bian, J. J., & Slone, A. D. (2012, July). NERC's risk assessment of reliability performance. In 2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting (pp. 1-6). IEEE.
- Lefebvre, A. (2009). Contribution à l'amélioration de la testabilité et du diagnostic de systèmes complexes : Application aux systèmes avioniques (Doctoral dissertation, Université Joseph-Fourier-Grenoble I).
- Leveson, N., Dulac, N., Zipkin, D., Cutcher-Gershenfeld, J., Carroll, J., & Barrett, B. (2006). Engineering resilience into safety-critical systems. Resilience Engineering—Concepts and Precepts. Ashgate Aldershot, 95-123.
- Leone, F., Péroche, M., Lagahé, E., Gherardi, M., Sahal, A., Vinet, F., ... & Lavigne, F. (2013). Modélisation de l'accessibilité territoriale pour l'aide à la gestion de crise tsunامي (Mayotte, France). In *Annales de géographie* (No. 5, pp. 502-524). Armand Colin.
- Litman, T. (2008). Evaluating Accessibility for Transportation Planning. Victoria Transport Policy Institute. *Victoria*.
- Li, R., Dong, Q., Jin, C., & Kang, R. (2017). A new resilience measure for supply chain networks. *Sustainability*, 9(1), 144.
- Liu, J., Dietz, T., Carpenter, S. R., Alberti, M., Folke, C., Moran, E., ... & Ostrom, E. (2007). Complexity of coupled human and natural systems. *science*, 317(5844), 1513-1516.
- Longstaff, P. H. (2005). Security, resilience, and communication in unpredictable environments such as terrorism, natural disasters, and complex technology. Center for Information Policy Research, Harvard University.
- Luzeaux, D. (2011). Ingénierie des grands systèmes complexes. Maîtrise de l'ingénierie des systèmes complexes et des systèmes de systèmes : études de cas, Hermes-Lavoisier, Paris, 21-106.
- Luzeaux, D., & Ruault, J. (2008). Systèmes de systèmes : concepts et illustrations pratiques. Lavoisier, Paris, France, 36.
- Lundberg, J., & Johansson, B. (2006, November). Resilience, stability and requisite interpretation in accident investigations. In *Proceedings of the Second Resilience Engineering Symposium* (pp. 191-198).
- Madni, A. M., & Jackson, S. (2009). Towards a conceptual framework for resilience engineering. *IEEE Systems Journal*, 3(2), 181-191.
- Maier, E., Mast, M., & LuperFoy, S. (1996). Dialogue Processing in Spoken Language Systems ECAI'96 Workshop Budapest, Hungary, August 13, 1996 Revised Papers. In *Conference proceedings DPSSL* (p. 11).

- Martin, J. N. (1998). Overview of the EIA 632 standard: processes for engineering a system. In 17th DASC. AIAA/IEEE/SAE. Digital Avionics Systems Conference. Proceedings (Cat. No. 98CH36267) (Vol. 1, pp. B32-1). IEEE.
- Masten, A. S., Best, K. M., & Garmezy, N. (1990). Resilience and development: Contributions from the study of children who overcome adversity. *Development and psychopathology*, 2(4), 425-444.
- Manyena, S. B., & Gordon, S. (2015). Bridging the concepts of resilience, fragility and stabilisation. *Disaster Prevention and Management*, 24(1), 38-52.
- McManus, H., & Hastings, D. (2005). 3.4. 1 A framework for understanding uncertainty and its mitigation and exploitation in complex systems. In INCOSE international symposium (Vol. 15, No. 1, pp. 484-503).
- Memon, H. H., & Alam, M. M. (2016). Reliability, maintainability, availability and failure rate analysis of IGBT triggering system designed for marine environment. In 2016 13th International Bhurban Conference on Applied Sciences and Technology (IBCAST) (pp. 295-299). IEEE.
- Mileti, D. (1999). *Disasters by design: A reassessment of natural hazards in the United States*. Joseph Henry Press.
- MilHdbk 2165, (1995). MILITARY HANDBOOK 2165 B, Testability handbook for systems and equipment, 1995, Department of Defence, United State of America.
- Moradi, B., Daclin, N., & Chapurlat, V. (2018a). Analysing eco-system ofilities for resilience evaluation in system of systems. In *Conférence Internationaledede Modélisation, Optimisation et Simulation (MOSIM 18)*.
- Moradi, B., Daclin, N., & Chapurlat, V. (2018b). Formalization and Evaluation of Non-functional Requirements: Application to Resilience. In Working Conference on Virtual Enterprises (pp. 124-131). Springer, Cham.
- Nan, C., & Sansavini, G. (2017). A quantitative method for assessing resilience of interdependent infrastructures. *Reliability Engineering & System Safety*, 157, 35-53.
- Nogal, M., O'Connor, A., Caulfield, B., & Martinez-Pastor, B. (2016). Resilience of traffic networks: From perturbation to recovery via a dynamic restricted equilibrium model. *Reliability Engineering & System Safety*, 156, 84-96.
- Olewnik, A., Brauen, T., Ferguson, S., & Lewis, K. (2004). A framework for flexible systems and its implementation in multiattribute decision making. *Journal of Mechanical Design*, 126(3), 412-419.
- Ouyang, M., Hong, L., Mao, Z.-J., Yu, M.-H., and Qi, F. (2009). "A methodological approach to analyze vulnerability of interdependent infrastructures." *Simulation Modeling and*

- Practice, 17, pp. 817-828.
- Ouyang, M., & Wang, Z. (2015). Resilience assessment of interdependent infrastructure systems: With a focus on joint restoration modeling and analysis. *Reliability Engineering & System Safety*, 141, 74-82.
- Pant, R., Barker, K., Ramirez-Marquez, J. E., & Rocco, C. M. (2014). Stochastic measures of resilience and their application to container terminals. *Computers & Industrial Engineering*, 70, 183-194.
- Quinlan, A. (2003). Resilience and adaptive capacity: Key components of sustainable social-ecological systems. Newsletter of the international Human Dimensions Programme on Global Environmental Change (IHDP), (2).
- Reggiani, A. (2011). Accessibility and resilience in complex networks. West Virginia University, USA, 28.
- Reed, D. A., Kapur, K. C., & Christie, R. D. (2009). Methodology for assessing the resilience of networked infrastructure. *IEEE Systems Journal*, 3(2), 174-180.
- Ricci N, Matthew E. Fitzgerald, Adam M. Ross, Donna H. Rhodes, (2014). Architecting Systems of Systems with Ilities: an Overview of the SAI Method, Conference on Systems Engineering Research (CSER 2014), Eds.: Azad M. Madni, Barry Boehm, Michael Sievers, Marilee Wheaton, CA, March 21-22,
- Ross, A. M., & Rhodes, D. H. (2015). Towards a prescriptive semantic basis for change-type ilities. *Procedia Computer Science*, 44, 443-453.
- Ross, A. M., & SE, M. (2014). Contributing toward a Prescriptive "Theory of Ilities". 1st Annual SERC Technical Review. RT-113 Foundations.
- Ross, A. M., Beesemyer, J. C., & Rhodes, D. H. (2011, a). A prescriptive semantic basis for system lifecycle properties (pp. 1-16). SEAr Working Paper Series, WP-2011-2-1.
- Ross, A.M., Hastings, D.E., de Weck, O., and Fitzgerald, M., (2011, b). "Adaptive and Resilient Space Systems," Panel, AIAA Space 2011, Long Beach, CA,
- Ross, A. M., Rhodes, D. H., & Hastings, D. E. (2008). Defining changeability: Reconciling flexibility, adaptability, scalability, modifiability, and robustness for maintaining system lifecycle value. *Systems Engineering*, 11(3), 246-262.
- Rose, A. (2007). Economic resilience to natural and man-made disasters: Multidisciplinary origins and contextual dimensions. *Environmental Hazards*, 7(4), 383-398.
- Rose, Kenneth. (2005). Project Quality Management: Why, What and How. J. Ross Pub.
- Robert, B., & Morabito, L. (2009,a). Réduire la vulnérabilité des infrastructures essentielles.

Lavoisier éd.). Paris.

Robert, B., Pinel, W., Pairet, J. Y., Rey, B., & Coeugnard, C. (2009,b). Résilience organisationnelle-Concepts et méthodologie d'évaluation. 48 p. Université Polytechnique de Montréal: Centre Risque & Performance.

Royce, F., Bekera Behailu. (2014). "A Metric and Frameworks for Resilience Analysis of Engineered and Infrastructure Systems." Reliability Engineering and System Safety.

Scucanec S.J., Van Gaasbeek J.R. (2008) A day in the life of a verification requirement, U.S Air Force T&E.

Seville, E., Brunson, D., Dantas, A., Le Masurier, J., Wilkinson, S., & Vargo, J. (2008). Organisational resilience: Researching the reality of New Zealand organisations. Journal of business continuity & emergency planning, 2(3), 258-266.

Sheard, S. (2008). 11.2. 2 a framework for system resilience discussions. In *INCOSE International Symposium* (Vol. 18, No. 1, pp. 1243-1257).

Sharma, A., & Kushwaha, D. S. (2010). Complexity measure based on requirement engineering document and its validation. In 2010 International Conference on Computer and Communication Technology (ICCCT) (pp. 608-615). IEEE.

Skogestad, S. (1996). A procedure for SISO controllability analysis—with application to design of pH neutralization processes. Computers & chemical engineering, 20(4), 373-386.

Sitruk, H. (1995). L'impact des réseaux sur les banques et l'économie bancaire. Revue d'économie financière, 89-109.

Stoicescu, M. (2013). Conception et implémentation de systèmes résilients par une approche à composants (Doctoral dissertation, École Doctorale Systèmes (Toulouse); 154236462).

Stevens, R. (1998). Systems engineering: coping with complexity. Pearson Education.

Thomas-Vaslin, V., & Jacquemart, F. (2016). Approche de la résilience et perturbations des systèmes complexes par une évaluation globale. In Congrès mondial pour la pensée complexe: Les défis d'un monde globalisé (pp. <https-www>).

Tolk, A. (2003). Beyond technical interoperability-introducing a reference model for measures of merit for coalition interoperability. Old Dominion Univ Norfolk VA.

UNESCO. (2017). "Disaster Planning: Prevention, Preparedness, Response, Recovery." http://webworld.unesco.org/safeguarding/en/pdf/txt_sini.pdf.

Vogus, T. J., & Sutcliffe, K. M. (2007). Organizational resilience: towards a theory and research agenda. In 2007 IEEE International Conference on Systems, Man and

- Cybernetics (pp. 3418-3422). IEEE.
- Walker, B., Holling, C. S., Carpenter, S., & Kinzig, A. (2004). Resilience, adaptability and transformability in social–ecological systems. *Ecology and society*, 9(2).
- Wahl, A. M., Sleire, H., Brurok, T., & Asbjørnslett, B. E. (2013). *Agility and Resilience in Offshore Operations*.
- weerde, A. (2009). *Requirements engineering: From system goals to UML models to software* (Vol. 10). Chichester, UK: John Wiley & Sons.
- Westrum, R. (2006). All coherence gone: New Orleans as a resilience failure. In 2nd symposium on resilience engineering. Juan-les-Pins, France, November (pp. 8-10).
- Willis, J. D., & Dam, S. (2011). *The Forgotten–Ilities*. Unpublished Report.
- Wood, K. L., & Antonsson, E. K. (1989). Computations with imprecise parameters in engineering design: background and theory. *Journal of Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design*, 111(4), 616-625.
- Yassine, A. A. (2007). Investigating product development process reliability and robustness using simulation. *Journal of Engineering Design*, 18(6), 545-561.
- Zio, E. (2016). Challenges in the vulnerability and risk analysis of critical infrastructures. *Reliability Engineering & System Safety*, 152, 137-15.
- Zobel, C. (2011). Representing the multi-dimensional nature of disaster resilience. In *Proceedings of the 8th International ISCRAM Conference–Lisbon, Portugal*.

Liste des publications

Conférences

“Analysing eco-system of “-ilities” for resilience evaluation in system of systems”, B. Moradi, N. Daclin, V. Chapurlat, Conférence Internationale de Modélisation, Optimisation et Simulation (*MOSIM 18*), Jun 2018, Toulouse, France.

“Analyzing Interoperability in a Non-functional Requirements Ecosystem to Support Crisis Management Response”, N. Daclin, B. Moradi, V. Chapurlat, In book: Enterprise Interoperability, Smart Services and Business Impact of Enterprise Interoperability, 2018/10.

“Formalization and Evaluation of Non-functional Requirements: Application to Resilience”, B. Moradi, N. Daclin, V. Chapurlat, in 19th IFIP WG 5.5 Working Conference on Virtual Enterprises, PRO-VE 2018, Cardiff, UK, September 17-19, 2018, Proceedings.

“A proposal for a Resilient Critical Infrastructures Model-Based Engineering Method”, B. Nastov, B. Moradi, N. Daclin, V. Chapurlat, ISCRAM may-2017, 14th International Conference on Information Systems for Crisis Response And Management Albi, Occitanie Pyrénées-Méditerranée, France.

“A New Normalized Method of Object Shape-based Recongnition and Localization”, B. Moradi, B. Magnier, in 10th International Conference on Pattern Recognition Systems, Conference ICPRS, July 2019.

“Multiple honey bees tracking and trajectory modeling”, B. Magnier, B. Moradi, in Conference: Multimodal Sensing and Artificial Intelligence: Technologies and Applications, SPIE Optical Metrology, 2019, Munich, Germany

“A Shock Filter for Image Deblurring and Enhancement with Oriented Hourglass Tensor”, B. Magnier, B. Moradi, in 11th International Symposium on Image and Signal Processing and Analysis, Dubrovnik, Croatia, September 23-25, 2019

Revue International

“Shape Similarity Measurement for Known-Object Localization: A New Normalized Assessment”, Magnier, B., & Moradi, B. (2019).. *Journal of Imaging*, 5(10), 77.

Conference national

“A new standard method for supervised recognition and shape-based object localization” B. Moradi, B. Magnier, in LFA 2019 – 28ES RENCONTRES FRANCOPHONES SUR LA LOGIQUE FLOUE ET SES APPLICATIONS, 14-15 Novembre 2019, Alès, France

Posters

“Formalization and Evaluation of Non-functional Requirement for system of system engineering: Application to resilience”, B. Moradi, N. Daclin, V. Chapurlat, ISCRAM may-2017

“Analyzing ecosystems of “-ilities” for resilience assessing”, B. Moradi, Journée de Doctorant university of Montpellier Juin-2018

Workshop

“Analyzing ecosystems of “-ilities” for resilience assessing in system of systems”, B. Moradi in JIEA 2018