

**Thèse de doctorat**

**Pour obtenir le grade de Docteur de l'Université de  
VALENCIENNES ET DU HAINAUT-CAMBRESIS**

Discipline, spécialité selon la liste des spécialités pour lesquelles l'Ecole Doctorale est accréditée :  
**Automatique. Automatique, Génie informatique**

**Présentée et soutenue par Kiswendsida Abel, OUEDRAOGO.**

**Le 14/02/2013, à Valenciennes**

**Ecole doctorale :**

Sciences Pour l'Ingénieur (SPI)

**Equipe de recherche, Laboratoire :**

Laboratoire d'Automatique, de Mécanique et d'Informatique Industrielles et Humaines (LAMIH)

**Apprentissage renforcé appliqué à l'évaluation de la résilience d'un Système  
Homme-Machine face à des situations critiques**

**JURY**

**Président du jury**

- Coppin, Gilles. Professeur, Telecom Bretagne.

**Rapporteurs**

- Grabot, Bernard. Professeur, ENI, Tarbes.
- Wieringa, Peter. Professeur, TU-Delft (Pays-Bas).

**Examineurs**

- Carsten, Oliver. Professeur, University of Leeds (Royaume-Uni).

**Directeur de thèse**

- Vanderhaegen, Frédéric. Professeur, UVHC, Valenciennes.

**Co-encadrant** : Enjalbert, Simon. Maitres de conférences, UVHC, Valenciennes.

## Remerciements

Le travail présenté dans ce mémoire a été réalisé au Laboratoire d'Automatique, de Mécanique et d'Informatique industrielles et Humaines (LAMIH) de l'Université de Valenciennes au sein de l'équipe Automatique et Système Homme-Machine.

Je tiens à remercier monsieur Frédéric Vanderhaegen, Professeur et responsable de la thématique Système Homme-Machine, et monsieur Simon Enjalbert, Maître de Conférences, pour avoir dirigé cette thèse, pour leur soutien, leur disponibilité, leur participation active et la confiance qu'ils m'ont témoignée au cours de ce long travail.

Je suis très reconnaissant envers messieurs Bernard Grabot, Professeur à l'École Nationale d'Ingénieurs de Tarbes, et Peter Wieringa, Professeur au Delft University of Technology (Pays-Bas) pour m'avoir fait l'honneur d'examiner ce mémoire et d'en être les rapporteurs.

Je remercie monsieur Gilles Coppin, Professeur à Telecom Bretagne pour m'avoir fait l'honneur de présider mon jury de thèse ; et monsieur Oliver Carsten, Professeur à University of Leeds (Royaume-Uni), pour avoir accepté de faire partie de mon jury de thèse.

Mes remerciements à tous les membres du projet REI-REACT, messieurs Laurent Karsenty et Adrien Quillaud de la société Dédale, monsieur Eddie Soulier de l'Université de Technologie de Troyes, et monsieur Hugues Choplin de l'Université de technologie de Compiègne; mes remerciements également à tous les membres du projet européen ITERATE.

J'exprimer ma profonde reconnaissance à toute l'équipe de la thématique Système Homme-Machine, ainsi qu'à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin au bon déroulement de cette thèse ; et plus particulièrement Boussaad, Djamel et Jérôme, merci pour le soutien, nos discussions et la bonne humeur au bureau.

Je ne pourrais oublier ici ma famille et mes amis proches qui m'ont facilité la vie durant ces dernières années. Un grand merci à ma sœur, Joséphine, mon frère Christophe, Eva, Alain, Rose, David, Véronique, Jean-Maurice, Aurélie, "Abelito", Constant, Ramde et Valentin.

*A la mémoire de mes parents,  
Marcelline et Pierre.*

## Table des matières

Index des figures .....	3
Liste des tableaux .....	5
Introduction générale .....	7
<b>Chapitre 1. De la sûreté de fonctionnement à la résilience des systèmes... 9</b>	
1 Introduction .....	10
2 La sûreté de fonctionnement dans les Systèmes Homme-Machine .....	11
2.1 La notion du risque.....	11
2.2 La sûreté de fonctionnement.....	12
2.3 Méthodes d'analyse des risques centrées sur les facteurs techniques.....	13
2.4 Méthodes d'analyse des risques centrées sur les facteurs humains .....	16
2.5 De la sûreté de fonctionnement à la résilience des systèmes.....	18
3 Le concept de résilience.....	21
3.1 Les principaux domaines d'application de la résilience.....	21
3.2 Synthèse des domaines d'application de la résilience .....	28
3.3 Les caractéristiques de la résilience .....	31
4 Conclusion .....	36
<b>Chapitre 2. Démarches et outils d'aide à la réaction et la récupération face à l'imprévu ..... 37</b>	
1 Introduction .....	38
2 Amélioration de la résilience par la gestion de l'imprévu.....	39
2.1 L'ingénierie de la résilience.....	39
2.2 Méthodologies .....	41
3 Démarches et outils pour réagir à l'imprévu .....	44
3.1 Les formations à la gestion de l'imprévu .....	44
3.2 Les méthodes de raisonnement pour réagir à l'imprévu.....	45
3.3 Outils d'entraînement à la prise de décision face à un imprévu .....	47
3.4 Synthèse des méthodes et outils pour réagir à l'imprévu .....	49
4 Système prédictif et/ou d'apprentissage d'aide à la résilience .....	51
4.1 La prédiction .....	51
4.2 L'apprentissage .....	52
4.3 Iterative learning control.....	53
4.4 Prédiction par réseau de neurones.....	55
5 Conclusion .....	59

<b>Chapitre 3. Elaboration d'indicateurs de résilience et leur intégration dans des processus d'apprentissage renforcé.....</b>	<b>61</b>
1 Introduction .....	62
2 Cadre des travaux de la thèse .....	63
2.1 Cadre des contributions de la thèse .....	63
2.2 Evaluation de l'état du Système Homme-Machine .....	64
3 Evaluation multicritères de la résilience.....	66
3.1 Couple d'indicateurs de la résilience.....	66
3.2 Exemple d'évaluation de la résilience .....	68
3.3 Construction d'un vecteur d'indicateurs de la résilience .....	69
4 Intégration des indicateurs de résilience dans des processus d'apprentissage.	71
4.1 Algorithme de Kohonen.....	73
4.2 Structure d'estimation par apprentissage renforcé .....	76
4.3 Renforcement des paramètres de la fonction d'estimation.....	78
4.4 Renforcement de la base de connaissance .....	79
4.5 Double renforcement .....	80
4.....	81
5 Conclusion .....	83
<b>Chapitre 4. Analyse des résultats expérimentaux de l'apprentissage renforcé pour l'évaluation de la résilience .....</b>	<b>85</b>
1 Introduction .....	86
2 Présentation de la campagne expérimentale.....	87
3 Apprentissage renforcé pour l'évaluation de la résilience.....	91
3.1. Définition des critères .....	91
3.2. Analyse des résultats de l'estimation de la résilience .....	94
3.3. Evaluation a posteriori de la résilience .....	105
3.4. Liens entre la classification des équipages et les résultats de REACT.....	110
4 Conclusion .....	115
<b>Chapitre 5. Perspectives .....</b>	<b>117</b>
1 Introduction .....	118
2 Vers un outil d'aide à l'action.....	119
2.1 Vers une prédiction en ligne des indicateurs de résilience.....	119
2.2 Outil d'aide à l'action .....	120
2.3 Exemple de mise en œuvre de la méthode AHP.....	121
3 Application à d'autres types situations .....	125
4 Conclusion .....	127
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>129</b>
<b>Bibliographie .....</b>	<b>131</b>

## Index des figures

Figure 1. Diagramme de Farmer .....	11
Figure 2. Modèle de graphe d'état.....	15
Figure 3. Modèle de classification des erreurs humaines [Reason, 1990] .....	17
Figure 4. Mouton-pendule pour la mesure de la résilience des matériaux .....	22
Figure 5. Mesures de la persistance, résistance et résilience [Pérez-España et Arreguin-Sanchez 2001] .....	23
Figure 6. Mesures de la résistance et de la résilience [Orwin et Wardle 2004].....	24
Figure 7. Effet d'une perturbation sur l'état du sol : résilience du sol (adapté de [Seybold et al., 1999]) .....	25
Figure 8. Résilience et notions associées dans différentes disciplines (adapté de [Lhomme et al., 2010]) .....	30
Figure 9. Relation entre stabilité et résilience en fonction des types d'évènements [Lundberg et Johansson, 2007] .....	32
Figure 10. Comportement de systèmes résistants, robustes et résilients [Fiksel 2003] .....	33
Figure 11. Organisation d'un système résilient [Hollnagel, 2006] .....	34
Figure 12. Interprétation temporelle du concept de résilience [Richard, 2012] .....	39
Figure 13. Les composantes de la Résilience d'un Système (adapté de [Hollnagel et Woods 2006]).....	40
Figure 14. « MicroSim » ou jeu sérieux pour mise en situation professionnelle [Catanese, 2009] .....	48
Figure 15. «Cor&Gest» ou jeu sérieux pour mise en situation de contrôle et de supervision [Vanderhaegen, 2009].....	49
Figure 16. Comportement face à l'imprévu (adaptée de [Vanderhaegen, 2010b]) .....	50
Figure 17. Principe de la prédiction de l'état d'un système .....	51
Figure 18. Principe de la prédiction basé sur l'apprentissage ou renforcement itératif (adaptée de [Polet et al., 2012]).....	52
Figure 19. Structure de commande combinée feedforward-feedback [Xu et al., 2004].....	54
Figure 20. Principe de l'apprentissage des réseaux de neurones .....	56
Figure 21. Organigramme de conception d'un réseau de neurones .....	57
Figure 22. Illustration graphique de la méthode de prédiction par réseau de Kohonen.....	58
Figure 23. Faisabilité de la mesure de la résilience d'un SHM face à une situation critique et son intégration dans un processus d'apprentissage .....	64
Figure 24. Evolution d'un critère pour l'évaluation de la résilience.....	67
Figure 25. Exemple d'évolution d'un critère pour l'évaluation de la résilience .....	68
Figure 26. Illustration de la carte de Kohonen (adaptée de [Zhang, 2004]) .....	72
Figure 27. Fonction de voisinage de type gaussien. ....	75
Figure 28. Structure d'estimation séquentielle itérative et renforcée.....	76
Figure 29. Algorithme du renforcement de la fonction d'estimation .....	79
Figure 30. Algorithme du renforcement de la base de connaissances .....	81
Figure 31. Algorithme du double renforcement .....	82
Figure 32. Equipage dans le simulateur de vol : un Boeing C-135 [Karsenty et al., 2011]....	87
Figure 33. Schéma du dispositif expérimental [Karsenty et al., 2011].....	88
Figure 34. Scénario 1 : courbes de la résilience locale «sécurité» mesurée et celle estimée de l'équipage 3 .....	95
Figure 35. Scénario 1 : courbes de la résilience globale «sécurité» mesurée et celle estimée de l'équipage 3 .....	95
Figure 36. Scénario 1 : erreur absolue d'estimation de la résilience locale et globale «sécurité» pour l'équipage 3 .....	95
Figure 37. Scénario 1 : différence d'erreurs absolues de l'estimation de la résilience locale et globale «sécurité» pour l'équipage 3 .....	96

Figure 38. Distribution des performances des algorithmes avec et sans renforcement des paramètres d'estimation.....	98
Figure 39. Scénario 2 : courbes de la résilience locale «sécurité» mesurée et celle estimée de l'équipage 1 .....	99
Figure 40. Scénario 2 : courbes de la résilience globale «sécurité» mesurée et celle estimée de l'équipage 1 .....	99
Figure 41. Scénario 2: erreur absolue d'estimation de la résilience locale et globale «sécurité» pour l'équipage 1 .....	99
Figure 42. Distribution des performances des algorithmes avec et sans renforcement des paramètres d'estimation.....	101
Figure 43. Scénario 1 : courbes d'évolution des critères « Sécurité/Charge de travail disponible/Mission » puis des résiliences locales et globales associées à chacun des critères pour l'équipage 3 .....	106
Figure 44. Scénario 2 : courbes d'évolution des critères « Sécurité/Charge de travail disponible/Mission» puis des résiliences locales et globales associées à chaque critère pour l'équipage 1 .....	108
Figure 45. Principes guidant la démarche REACT [Karsenty et al., 2011] .....	110
Figure 46. Exemple de Processus Hiérarchique d'Analyse pour une aide à la décision multicritères.....	121
Figure 47. Exemple de calcul du vecteur de priorité des critères du SHM.....	123
Figure 48. «Cor&Gest» plateforme ferroviaire pour mise en situation de contrôle et de supervision [Vanderhaegen, 2009].....	126

## Liste des tableaux

Tableau 1. Tableau d'analyse pour l'APD .....	13
Tableau 2. Exemple de grille d'analyse [Vanderhaegen, 2003].....	14
Tableau 3. Principales méthodes de la sûreté de fonctionnement (adapté de [Mortureux, 2002]).....	15
Tableau 4. Critères d'acceptabilité des risques en sûreté de fonctionnement [adapté normes EN 50126]. .....	19
Tableau 5. Synthèse des domaines d'application de la résilience.....	29
Tableau 6. Récapitulatif des caractéristiques des systèmes stables, résistants, robustes et résilients [Ziéba, 2009]. .....	33
Tableau 7. Structures feedforward-feedback pour l'apprentissage itératif .....	55
Tableau 8. Evolutions possibles de la résilience locale et globale.....	67
Tableau 9. Evolutions temporelles de la résilience locale et globale.....	69
Tableau 10. Evolutions temporelles des valeurs normalisées la résilience locale et globale ..	78
Tableau 11. Tableau de synthèse des profils par équipage.....	88
Tableau 12. Modèle de transcription des expérimentations.....	90
Tableau 13. Effets des événements sur le critère «sécurité» .....	93
Tableau 14. Calculs des erreurs absolues moyennes, erreurs quadratiques moyennes, taux d'estimation correcte relatifs à la résilience locale et globale « sécurité » de tous les équipages lors du scénario 1 .....	97
Tableau 15. Calculs des erreurs absolues moyennes, erreurs quadratiques moyennes, taux d'estimation correcte relatifs à la résilience locale et globale « sécurité » de tous les équipages lors du scénario 2 .....	100
Tableau 16. Calculs des erreurs absolues moyennes, erreurs quadratiques moyennes, taux d'estimation correcte relatifs à la résilience locale et globale « sécurité » de tous les équipages lors du scénario 1 .....	102
Tableau 17. Calculs des erreurs absolues moyennes, erreurs quadratiques moyennes, taux d'estimation correcte relatifs à la résilience locale et globale « sécurité » de tous les équipages lors du scénario 2 .....	103
Tableau 18. Moyennes des erreurs absolues moyennes et des erreurs quadratiques moyennes relatives à la résilience locale et globale « sécurité » pour les deux scénarios ..	104
Tableau 19. Heure de l'annonce des évènements sans précédent pour chaque scénario ...	105
Tableau 20. Evolution de la résilience locale et globale de l'équipage 3 lors du scénario 1.	107
Tableau 21. Scénario 1 : classement des équipages en fonction des indicateurs de résiliences locales et globales .....	107
Tableau 22. Evolution de la résilience locale et globale de l'équipage 1 lors du scénario 2.	109
Tableau 23. Scénario 2 : classement des équipages en fonction des indicateurs de résiliences locales et globales .....	110
Tableau 24. Résultats de l'analyse de la démarche REACT pour le scénario 1 .....	112
Tableau 25. Comparaison du classement des équipages en termes de résilience et des résultats de la démarche REACT .....	113
Tableau 26. Résultats de l'analyse de la démarche REACT pour le scénario 2 .....	113
Tableau 27. Comparaison du classement des équipages en termes de résilience et des résultats de la démarche REACT .....	114
Tableau 28. Echelle des valeurs de pondération pour la comparaison binaire des critères .	122
Tableau 29. Exemple de comparaison binaire des critères d'évaluation d'un SHM.....	122
Tableau 30. Exemple de comparaison binaire des sous-critères indicateurs de résilience locale et globale .....	123
Tableau 31. Critères d'acceptabilité des risques en sûreté de fonctionnement [adapté normes EN 50126]. .....	125



## Introduction générale

Les développements technologiques rapides dans les systèmes sociotechniques rendent ces systèmes sophistiqués et complexes, et conduisent potentiellement à des événements indésirables. La gestion des risques ou dangers engendrés par ces perturbations vise à rendre ces risques acceptables par l'amélioration du niveau de sécurité du système. La sécurité de ces systèmes notamment les Systèmes Homme-Machine (SHM), devient alors essentielle pour les concepteurs, les exploitants mais surtout pour les utilisateurs. En tant que composante du SHM, l'opérateur humain est au "cœur" du système. Des méthodes et des outils existent et permettent de prendre en compte et de gérer les risques lors de la conception et de l'exploitation des systèmes sociotechniques. Ces méthodes de la sûreté de fonctionnement prennent bien en compte les facteurs techniques des risques mais peinent à intégrer l'aspect humain dans les analyses de risques. Or pour les SHM, la nécessité de prendre en compte l'opérateur humain est primordiale; il est le dernier rempart pouvant réagir lors de l'occurrence d'événements indésirables et/ou imprévus par le concepteur mais auxquels il est directement exposé. Néanmoins, le comportement de l'opérateur peut également conduire à des événements redoutés. Les erreurs humaines sont encore la source de bon nombre d'accidents de nos jours.

Les traditionnels outils et méthodes de la sûreté de fonctionnement restent donc limités pour l'analyse des risques dans le domaine des SHM. Le concept de la résilience commence alors à émerger dans la communauté de la maîtrise des risques pour dépasser les limites des outils et méthodes traditionnels et s'intéresser à la capacité à "survivre" tant aux événements prévisibles qu'à ceux totalement imprévisibles [Gajewski *et al.*, 2008, Hollnagel *et al.*, 2006]. Le concept polysémique de la résilience désigne dans son domaine d'origine qu'est la métallurgie, la capacité d'un matériau à retrouver son état initial à la suite d'un choc ou d'une contrainte particulière. Même si la démarche de définition et d'analyse de la résilience des systèmes reste largement à développer, le concept a déjà été adopté et étudié dans divers domaines : l'écologie, la psychologie, l'économie, l'informatique, etc.

Dans le contexte d'un SHM faisant face à des événements imprévus notamment sans précédent, nous nous intéresserons donc à l'analyse de la résilience de tels systèmes et les relations entre le concept de résilience et l'apprentissage des Systèmes Homme-Machine. Cette étude s'inscrit dans le cadre de la discipline "Automatique Humaine" pour la conception, l'analyse et l'évaluation des Systèmes Hommes-Machines. Nos travaux s'appuient sur les recherches menées au sein du groupe Automatique et Système Homme-Machine (ASHM) du Laboratoire d'Automatique, de Mécanique et d'Informatique industrielles et Humaines. L'évaluation de la réactivité à l'imprévu, liée à la sûreté de fonctionnement de systèmes techniques et humains par résilience, a donné lieu au montage d'un projet de Recherche Exploratoire et Innovation de la Direction Générale de l'Armement intitulé REACT : Réactivité à l'imprévu et réinterprétation collective de la situation.

### *Objectifs de la thèse*

Dans cette thèse, une méthode d'évaluation de la résilience d'un SHM et un outil pour l'exploitation des indicateurs de résilience obtenus dans des processus d'apprentissage, sont proposés. La méthode a pour but de définir et d'évaluer par un couple d'indicateurs, la résilience multicritères locale et globale des Systèmes Hommes-Machines faisant face à des événements sans précédent. Un outil est développé pour estimer les indicateurs de résilience qui ne peuvent être mesurés "en ligne". Le vecteur d'indicateurs de résilience obtenu représente l'état du SHM face aux perturbations. L'estimation permettra d'appréhender "en ligne" la situation dite "critique" en cours. L'outil permet également d'exploiter ces indicateurs dans des processus d'apprentissage afin de mieux apprendre des situations critiques ; les perspectives étant d'accroître ou d'adapter les capacités cognitives de systèmes d'aide à l'opérateur.

## Organisation du mémoire

Ce mémoire est organisé en cinq chapitres. Dans le premier, nous abordons la problématique du risque dans le contexte des Systèmes Hommes-Machines. Le Système Homme-Machine est défini. La notion de risque est introduite et les aspects spécifiques aux SHMs sont ensuite abordés. Dans une démarche d'analyse des risques, nous présentons des méthodes de la sûreté de fonctionnement pour l'amélioration de la sécurité dans les systèmes. Cette démarche est relative à l'identification, à la quantification et à la gestion des causes de dysfonctionnement, qu'elles soient d'origine technique ou dues à une erreur humaine. Ces méthodes d'analyse permettent de réduire l'occurrence des événements à risque mais sont néanmoins limitées dans la prise en compte du comportement humain pourtant source de la majorité des accidents. De plus, les erreurs humaines, la complexité croissante et l'intrication des systèmes techniques et organisationnels conduisent à l'occurrence d'événements sans précédents ; d'où l'émergence du concept de résilience pour une maîtrise proactive de ces types d'événements. Un état de l'art du concept de résilience est présenté à partir des travaux réalisés dans divers domaines de recherche. Les différentes définitions et les méthodes de mesure de la résilience sont étudiées. Une analyse des apports et des limites de ces méthodes pour l'évaluation de la résilience d'un SHM est ensuite présentée.

Dans le deuxième chapitre, les démarches et les outils d'aide à la réaction et à la récupération des systèmes face aux imprévus sont présentés. La résilience permet de gérer l'occurrence des perturbations imprévues soit de manière anticipative, soit de manière curative. Pour la manière anticipative, ce sont les prémices ou les signaux faibles annonciateurs d'accidents qui sont traités. Pour la manière curative, le système réagit à l'occurrence effective d'événements imprévus pour récupérer des conséquences éventuelles de ces événements imprévus. Les méthodes de formation à la gestion de l'imprévu, les méthodes de raisonnement pour réagir à l'imprévu ainsi que les outils d'entraînement à la prise de décision face à l'imprévu sont donc détaillées. Nous abordons également les apports des processus humains d'apprentissage et des systèmes prédictifs en termes d'aide à la gestion des imprévus.

Dans le troisième chapitre, nous présentons la méthode d'évaluation de la résilience que nous proposons et l'intégration des indicateurs de résilience obtenus dans des processus d'apprentissage. Sur la base d'un ensemble de critères définis en fonction du SHM étudié, nous calculons le couple d'indicateurs (résilience locale, résilience globale) de chacun des critères. L'ensemble des couples d'indicateurs obtenu constitue la mesure de l'état de SHM en termes de résilience. Un estimateur reposant sur un réseau de neurones à apprentissage renforcé est proposé pour évaluer les indicateurs de résilience non mesurables "en ligne". Pour fiabiliser l'estimation, nous proposons dans un premier temps, un processus d'apprentissage itératif par renforcement des paramètres d'estimation. Ensuite, un deuxième processus d'apprentissage par renforcement de la base de connaissances associée aux neurones d'un réseau est développé. Dans le troisième processus d'apprentissage, un double renforcement est proposé dans lequel nous associons le renforcement des paramètres d'estimation et le renforcement de la base de connaissances.

Le quatrième chapitre a pour but de présenter l'analyse des résultats de la méthode d'évaluation de la résilience et de l'outil d'estimation proposés. Une campagne expérimentale a été menée dans le cadre du projet REI-REACT et une démarche de réactivité à l'imprévu a été testée. Nous avons étudié l'apport de notre méthode d'évaluation de la résilience ainsi que la qualité d'estimation de notre outil. Une comparaison des résultats obtenus avec ceux issus de l'analyse de la démarche REACT permet de conforter nos contributions.

Bien que l'étude ait été effectuée *a posteriori*, l'objectif est néanmoins de pouvoir évaluer et estimer la résilience d'un SHM "en ligne". A la lumière des conclusions tirées, nous abordons quelques perspectives de recherche relatives à nos travaux.

---

# Chapitre 1. De la sûreté de fonctionnement à la résilience des systèmes

---

Chapitre 1. De la sûreté de fonctionnement à la résilience des systèmes.....	9
1 Introduction .....	10
2 La sûreté de fonctionnement dans les Systèmes Homme-Machine.....	11
2.1 Notion du risque relative à la sécurité .....	11
2.2 La sûreté de fonctionnement.....	12
2.3 Méthodes d'analyse des risques centrées sur les facteurs techniques.....	13
2.4 Méthodes d'analyse des risques centrées sur les facteurs humains .....	16
2.5 De la sûreté de fonctionnement à la résilience des systèmes.....	18
3 Le concept de résilience.....	21
3.1 Les principaux domaines d'application de la résilience.....	21
3.2 Synthèse des domaines d'application de la résilience .....	28
3.3 Les caractéristiques de la résilience .....	31
4 Conclusion .....	36

## 1 Introduction

Ce premier chapitre a pour objectif de présenter la problématique du risque dans le contexte des Systèmes Homme-Machine. Dans ce chapitre, nous abordons l'étude de la sûreté de fonctionnement des systèmes et le concept de résilience.

Dans la première partie du chapitre, nous rappelons brièvement la définition de Système Homme-Machine. Puis, la notion de risque est introduite et les aspects spécifiques aux SHM sont abordés. En effet, les problèmes techniques mais surtout les erreurs humaines sont à l'origine de la majorité des accidents ou des événements redoutés [Amalberti, 2001]. Les solutions d'amélioration de la sécurité de ces systèmes sont exposées par la suite à travers la démarche d'analyse des risques. Cette démarche s'intègre dans l'étude de la sûreté de fonctionnement; il s'agit d'identifier, de quantifier et de gérer les causes de dysfonctionnement ou risques potentiels du système.

L'ensemble des méthodes de la sûreté de fonctionnement permet de réduire l'occurrence d'évènements indésirables. Néanmoins le risque existe toujours; la complexité croissante des systèmes actuels, la prise en compte marginale du comportement humain, l'intrication des systèmes techniques et organisationnels, etc., font que les opérateurs humains se retrouvent souvent face à des situations critiques engendrées par l'occurrence d'évènements sans précédents. Dans ce contexte, des groupes de recherche au sein de l'Institut pour la Maitrise des Risques (IMdR) ou le groupe de travail "Résilience des Systèmes" de l'Association Française de l'Ingénierie Système (AFIS), préconisent de nouveaux concepts tels que la notion de résilience. Ce concept est de plus abordé dans la littérature au travers des titres comme "De la sûreté de fonctionnement à la résilience des systèmes" [Gajewski, 2008].

Nous présentons donc, dans la deuxième partie de ce chapitre, un état de l'art reposant sur le concept de résilience que nous positionnons par rapport aux approches classiques de la sûreté de fonctionnement pour l'évaluation des risques dans les SHM. Nous abordons les différentes définitions du concept de résilience et les approches de mesure de la résilience dans divers domaines.

Cette étude nous permet d'une part, de retenir une définition de la résilience d'un SHM face à une situation critique et d'autre part de mettre en lumière les limites des approches existantes pour l'évaluation de la résilience d'un SHM.

## 2 La sûreté de fonctionnement dans les Systèmes Homme-Machine

D'après Sperandio, « Un Système Homme-Machine est une organisation d'hommes et de systèmes techniques reliés entre eux par des moyens de communication et interagissant en vue d'atteindre un but commun en fonction des contraintes de l'environnement » [Sperandio, 1988]. C'est un ensemble dynamique mettant en jeu à la fois des compétences techniques, organisationnelles et humaines.

Le Système Homme-Machine est un système qui évolue constamment mettant en jeu à la fois les compétences techniques et humaines. Les interactions entre l'opérateur humain et le système technique influencent les paramètres de la sûreté de fonctionnement ; l'analyse des risques doit tenir compte de l'ensemble du Système Homme-Machine (l'opérateur humain, le système technique et leur organisation au sein de l'environnement de travail [Chaali-Djelassi, 2007]). L'occurrence d'un événement redouté dans un Système Homme-Machine peut avoir des conséquences négatives sur le système, les opérateurs humains ou l'environnement. Il est donc nécessaire d'établir une étude de sûreté de fonctionnement dans les Systèmes Homme-Machine et de définir les éléments de cette étude.

Dans un premier temps, nous présentons la notion du risque relative à la sécurité pour introduire les méthodes d'analyse des risques en sûreté de fonctionnement.

### 2.1 La notion du risque

Le risque est étroitement lié à l'étude de la sécurité. La norme [ISO 12100-1/A1, 2004] définit le risque comme la combinaison de la probabilité d'occurrence d'un dommage et de la gravité de ce dommage [...]. Le risque est donc un événement redouté évalué en termes de fréquence et de gravité. En sûreté de fonctionnement, il s'agit d'identifier les événements indésirables, d'évaluer leurs fréquences d'occurrence et la gravité associée afin de prendre des décisions adéquates en fonction de leurs impacts sur le système [Mortureux, 2002].

Le diagramme fréquence-gravité d'un événement ou diagramme de Farmer de la Figure 1, permet de caractériser le risque au travers une courbe exprimant la fréquence d'occurrence d'un événement ou le nombre de défaillances et la gravité des conséquences souvent exprimée en nombre de victimes. Le niveau de risque ou la mesure du risque associe l'estimation des paramètres fréquence-gravité. Cette représentation permet de distinguer le domaine des risques acceptables du domaine des risques inacceptables par rapport à un certain seuil.

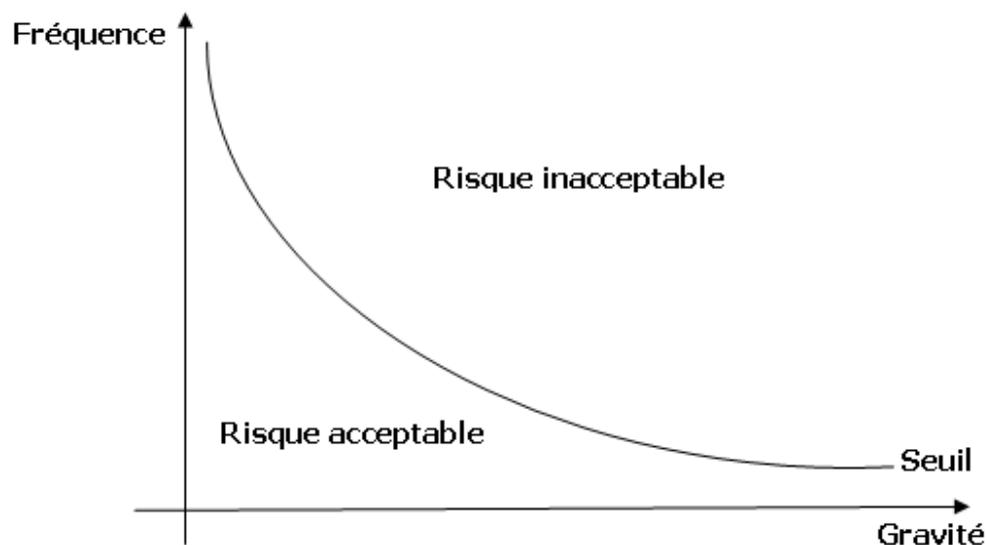


Figure 1. Diagramme de Farmer

Le compromis fréquence-gravité est appelé criticité; lorsque ce compromis est au-dessus du seuil, le risque est considéré comme inacceptable. Lorsqu'il est en-dessous, le risque est considéré comme acceptable. Cette acceptabilité du risque passe par une analyse des risques sur les systèmes. Si le risque est acceptable, l'analyse des risques peut prendre fin ; sinon, une réduction du risque est nécessaire.

Du fait de la composition du Système Homme-Machine, l'analyse des risques doit tenir compte des défaillances techniques et des défaillances humaines. La démarche d'analyse des risques fait appel à des méthodes dites de sûreté de fonctionnement, permettant par la suite de proposer des mesures préventives afin de réduire le risque et de maintenir la sûreté du système. L'étude de sûreté de fonctionnement des Systèmes Homme-Machine concerne à la fois leur conception (évaluation *a priori* du risque) et leur exploitation (évaluation *a posteriori* du risque).

Avant de décrire les principales méthodes et démarches employées en conception et/ou en exploitation, pour analyser les risques d'un système, nous présentons dans la section suivante la notion de sûreté de fonctionnement.

## **2.2 La sûreté de fonctionnement**

La sûreté de fonctionnement est l'aptitude d'une entité à satisfaire une ou plusieurs fonctions requises dans des conditions données. C'est la propriété qui définit la qualité du service délivré par un système, de manière à ce que l'utilisateur ait en lui une confiance justifiée [Schneider Electric, 2004 ; Laprie *et al.*, 2004]. Cette confiance justifiée s'obtient à travers une analyse qualitative et quantitative des différentes propriétés du service délivré par le système, mesurée par les grandeurs probabilistes associées : fiabilité, maintenabilité, disponibilité et sécurité.

- la fiabilité est l'aptitude d'une entité à satisfaire une fonction requise dans des conditions données et pendant un intervalle de temps donné. Elle est caractérisée par la probabilité  $R(t)$  (de l'anglais Reliability) que l'entité accomplissant une fonction à l'instant 0 l'accomplisse toujours à l'instant  $t$ . Le système fiable est donc non défaillant sur l'intervalle  $[0, t]$ .
- la disponibilité est l'aptitude d'une entité à être en état d'accomplir une ou les fonctions requises, dans des conditions données et à un instant donné; Elle se caractérise par la probabilité  $A(t)$  (de l'anglais Availability) d'être en état, à l'instant  $t$ , d'accomplir les fonctions requises. Le système disponible est non défaillant à l'instant  $t$ .
- la maintenabilité est l'aptitude d'une entité à être maintenue ou remise en état de fonctionnement après une défaillance. Elle se caractérise par la probabilité  $M(t)$  (de l'anglais Maintainability) d'être en état de fonctionnement à l'instant  $t$ , sachant qu'elle était en panne à l'instant 0 ; le système est réparé durant l'intervalle  $[0, t]$ .
- la sécurité est l'aptitude d'une entité à éviter de faire apparaître, dans des conditions données, des événements critiques pour les opérateurs, le système technique et l'environnement. Le système ne présente aucune défaillance catastrophique sur l'intervalle  $[0, t]$ .

Dès lors que la sécurité ou la disponibilité d'un système est mise en défaut, on incrimine sa fiabilité. Enfin, en cas de dysfonctionnement, il convient de ramener le système dans les conditions de fonctionnement initiaux, c'est la maintenabilité [Schneider Electric, 2004].

La sûreté de fonctionnement est considérée comme la science des défaillances et des pannes. Deux catégories de défaillances peuvent apparaître dans les Systèmes Homme-Machine : les défaillances techniques et les défaillances humaines. En effet, l'étude de la sûreté de fonctionnement dans les SHM doit prendre en compte ces deux dimensions. La sûreté de fonctionnement est une palette de méthodes et de concepts au service de la maîtrise des risques.

Nous résumons, dans la section suivante, quelques méthodes d'évaluation de sécurité ou d'analyse de la sûreté de fonctionnement. Nous distinguons les méthodes centrées sur les facteurs techniques et celles centrées sur les facteurs humains.

### **2.3 Méthodes d'analyse des risques centrées sur les facteurs techniques**

L'objectif des méthodes d'analyse du risque est d'évaluer le risque à partir de l'identification des défaillances potentielles. Plusieurs méthodes existent et font l'objet de nombreux ouvrages [Villemeur, 1988; Mortureux, 2002]. Nous ne présentons ici que quelques méthodes.

#### **- Analyse Préliminaire des Dangers ou des Risques (APD/APR)**

L'analyse préliminaire des dangers ou des risques (APD/APR) est une méthode d'identification des risques et d'évaluation de leur criticité notamment lors de la phase de la conception d'un système. Elle peut être aussi utilisée avec profit pendant toute la durée de vie de ce système. Les entités et les situations dangereuses auxquelles le système est susceptible d'être exposé, sont identifiées et capitalisées dans un tableau de synthèse (Tableau 1) adapté en fonction des objectifs fixés au préalable.

**Tableau 1. Tableau d'analyse pour l'APD**

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Système ou fonction	Phase	Entités dangereuses	Evènements causant une situation dangereuse	Situation dangereuse	Evènement causant un accident potentiel	Accident potentiel	Effet ou conséquences	Classification par gravité	Mesures préventives	Application de ces mesures

L'avantage de l'APR est de permettre un examen relativement rapide des situations dangereuses sur des installations. En revanche, l'APR ne permet pas de caractériser finement l'enchaînement des évènements susceptibles de conduire à un accident majeur pour des systèmes complexes. C'est une méthode préliminaire d'analyse qui permet d'identifier des points critiques devant faire l'objet d'études plus détaillées grâce à d'autres méthodes.

#### **- Analyse des Modes de Défaillances, de leurs Effets et de leur Criticité (AMDEC)**

La méthode AMDEC détermine les modes de défaillances potentielles, leurs causes possibles, et leurs effets sur le Système Homme-Machine, en évaluant pour chacun d'eux la criticité à partir de la gravité et la fréquence. L'AMDE est la version non quantifiée (absence de l'évaluation de la criticité) de l'AMDEC. L'AMDEC permet de faire une analyse des performances du système en termes de fiabilité, de disponibilité, de maintenabilité et de sécurité. Cette analyse permet alors d'identifier les modes de défaillances des composants du système et d'évaluer les effets de chacun de ces modes de défaillances sur le système.

La méthode repose sur une grille d'analyse qui peut être adaptée et modifiée selon les objectifs et le système de l'étude (Tableau 2). Une analyse de criticité est ensuite réalisée pour évaluer la probabilité d'occurrence ainsi que la gravité des effets de chaque mode de défaillance.

**Tableau 2. Exemple de grille d'analyse [Vanderhaegen, 2003]**

Identification du composant	Fonctions états	Modes de défaillance	Causes possibles	Effets	Criticité	Moyens de détection	Parades de l'opérateur humain	Observations

**- Méthode des Arbres (Défaillances/Causes/Conséquences)**

La méthode de *l'arbre des défaillances* est basée sur une représentation graphique de combinaisons de causes et de conditions qui peuvent aboutir à un événement redouté (dysfonctionnement, incident ou accident), point de départ de l'étude. La construction d'un arbre de défaillance (en anglais : Fault Tree Analysis) revient à répondre à la question : comment tel événement peut-il arriver?

*L'arbre des causes* repose sur un raisonnement dans le même sens que l'arbre des défaillances mais ne décrit qu'un scénario. Chaque arbre des causes constitue un sous-ensemble de l'arbre des défaillances complet puisque l'accident étudié devrait être la réalisation d'une des possibilités décrites par l'arbre des défaillances.

*Un arbre d'événement*, également appelé "*l'arbre des conséquences*", part d'un événement redouté (origine), et s'interroge sur les différentes conséquences qu'il peut avoir en fonction des conditions dans lesquelles il s'est produit et des événements avec lesquels il se combine. Il repose sur un raisonnement inverse des arbres précédents : de la cause vers les conséquences.

*Le nœud de papillon ou diagramme causes-conséquences* combine un arbre des défaillances (ou des causes) et un arbre des conséquences. Cette méthode est relativement lourde à mettre en place et particulièrement coûteuse en temps. Néanmoins, elle offre une visualisation concrète des scénarios d'accidents qui pourraient survenir en partant des causes initiales de l'accident jusqu'aux conséquences sur les éléments du système.

Les méthodes présentées (APR, AMDEC, Méthodes des arbres) ont comme inconvénient de ne pas rendre compte efficacement de l'aspect temporel des scénarios d'incident ou d'accident ; la méthode des espaces d'états permet alors de prendre en compte l'aspect temporel des scénarios.

**- Méthode de l'Espace des Etats (MEE)**

La Méthode de l'Espace des Etats (MEE) ou "graphe d'état" permet de tenir compte de l'évolution temporelle des scénarios d'incident ou d'accident. Elle est dédiée aux systèmes à composants réparables et repose sur l'élaboration d'un graphe dont les places correspondent aux états du système et les arcs correspondent aux transitions entre ces différents états (Figure 2).

Le graphe d'état a pour but d'évaluer les principales caractéristiques de fiabilité et surtout de disponibilité d'un système. Les états possibles du système sont caractérisés par le fonctionnement ou le non-fonctionnement (nominal, dégradé ou panne) des éléments. Ces états sont modélisés à l'aide de cercles reliés entre eux par des arcs qui représentent les transitions possibles (Figure 2), conditionnées par les défaillances caractérisées par le taux de défaillance  $\lambda$  et les réparations caractérisées par le taux de réparation  $\mu$ . Le diagramme d'état obtenu donne lieu à un système d'équations différentielles dont la résolution permet de calculer les probabilités associées aux différents états et les principales caractéristiques du système *i.e.* :

- évaluer la proportion du temps passé dans chacun des états en fonction des taux de défaillance et des taux de réparation,
- La disponibilité instantanée ou en régime établi,

- La fréquence moyenne des pannes, etc.

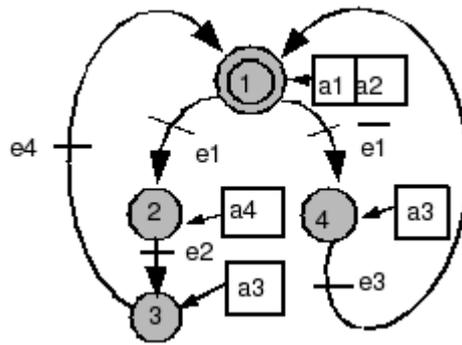


Figure 2. Modèle de graphe d'état

### - Synthèse des méthodes centrées sur les facteurs techniques

Le Tableau 3 recense les méthodes et outils les plus utilisés notamment en accidentologie. Les méthodes inductives décrivent des liens causes-conséquences et débutent des causes pour en déduire les conséquences. Par opposition, les méthodes déductives débutent des conséquences pour remonter aux causes.

Tableau 3. Principales méthodes de la sûreté de fonctionnement (adapté de [Mortureux, 2002])

Démarches/Méthodes	Inductive/déductive	Quantitative/qualitative	Fonction
Analyse des modes de défaillance, de leurs effets et de leurs criticités (AMDEC)	Inductive	Quantitative	Recenser et évaluer les conséquences des défaillances
Arbre de causes	Déductive	Qualitative	Organiser les éléments ayant contribué à un accident
Arbre des conséquences	Inductive	Quantitative	Évaluer les conséquences possibles d'un événement
Arbre de défaillances	Déductive	Quantitative	Évaluer les scénarios d'un accident potentiel
Méthode de l'Espace des Etats (MEE) Ou Graphe d'état	Inductive	Quantitative	Évaluer les états possibles d'un système réparable
Analyse Préliminaire des Dangers ou des Risques (APD/APR)	Inductive	Qualitative	Repérer <i>a priori</i> les risques (dangers) à étudier
Retour d'expérience	Déductive	Quantitative	Collecter et exploiter les données sur les dysfonctionnements du système

Les méthodes présentées sont conçues pour mettre en œuvre des fonctions différentes. Elles ne se présentent donc nullement comme des choix alternatifs pour un même problème. Chacune correspond à une approche différente. De plus, ces méthodes et outils sont utilisés *a posteriori* ou *a priori* mais pourraient être exploitées en cours d'action.

Ces différentes méthodes permettent de recenser et d'évaluer les conséquences et/ou scénarios de défaillances possibles, ce qui pourrait permettre l'élaboration de plans de prévention. En outre, les informations recueillies peuvent servir de retour d'expérience. Le retour d'expérience désigne l'ensemble des dispositions permettant de recueillir des informations sur la fiabilité opérationnelle des produits et systèmes auxquels on s'intéresse : pannes, défaillances, maintenances diverses. Si le recueil de données est fidèle à la réalité, il est possible, grâce à des techniques statistiques adaptées, de calculer les indicateurs de sûreté de fonctionnement correspondants spécifiques pour le système considéré.

Les différentes méthodes et démarches présentées sont parfois utilisées de manière complémentaire. Cependant, pour l'analyse des risques au sein d'un Système Homme-Machine, ces méthodes ne prennent pas (ou prennent difficilement) en compte les facteurs humains, notamment l'erreur humaine. Il est donc nécessaire de recourir à des modèles et des méthodes propres à l'analyse des facteurs humains. La section suivante présente quelques-unes de ces méthodes liées à la prise en compte des facteurs humains dans les études de sûreté de fonctionnement des Systèmes Homme-Machine.

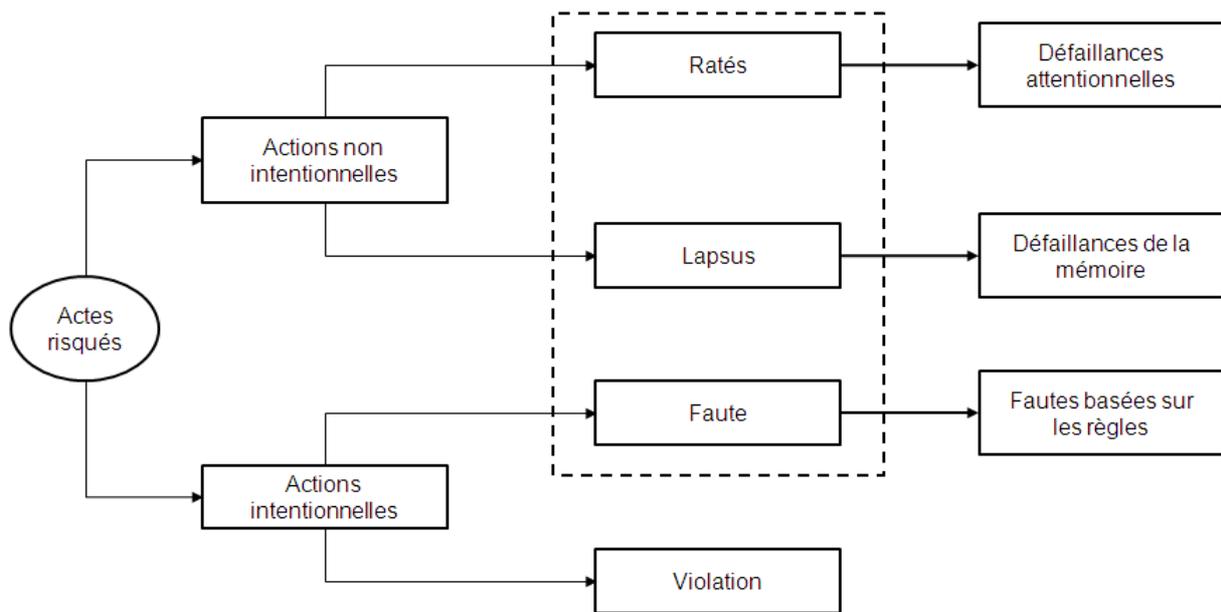
#### **2.4 Méthodes d'analyse des risques centrées sur les facteurs humains**

Dans les systèmes complexes, l'erreur humaine est à l'origine de 65 % à 80 % des accidents [Amalberti, 01]. L'erreur humaine est définie comme l'écart entre la tâche prescrite et l'activité, c'est-à-dire entre le travail prévu et prescrit pour l'opérateur humain et le travail effectivement réalisé. L'opérateur humain est alors perçu comme une source de défaillance mais aussi comme un élément assurant la sécurité du système. Ainsi des études spécifiques sur l'opérateur humain ont vu le jour notamment sur une classification de l'erreur humaine et sur la mise au point de méthodes de quantification de l'erreur humaine.

Pour la compréhension des mécanismes de l'erreur humaine, des modèles liés au mauvais comportement de l'opérateur humain ont été développés. La Figure 3 présente le modèle de classification des erreurs humaines selon Reason [Reason, 1990]. Ce modèle permet d'établir un diagnostic de l'erreur humaine à partir d'une taxonomie qui distingue deux catégories d'erreur humaine et quatre modes d'erreur :

- actions ou erreurs non intentionnelles : relatives aux ratés et aux lapsus,
- actions ou erreurs intentionnelles : relatives aux fautes et aux violations.

Les erreurs non intentionnelles résultent d'actions pour lesquelles l'opérateur n'avait pas l'intention de diverger par rapport à ce qu'il avait prévu; les modes d'erreurs sont ici, les ratés correspondant à des défaillances attentionnelles telles que l'intrusion, le contretemps, l'omission... Les lapsus sont induits par des défaillances de la mémoire comme la perte de lieu, l'oubli d'intention, etc. Dans les erreurs intentionnelles, il n'y a pas divergence entre ce que l'opérateur avait prévu de faire et ce qu'il fait réellement. Les violations diffèrent des fautes dans le sens où l'opérateur est conscient de son action violant la (les) procédure(s), il agit soit avec de mauvaises intentions (*e.g.*, un sabotage), soit avec de bonnes intentions (*e.g.*, prévenir un accident).



**Figure 3. Modèle de classification des erreurs humaines [Reason, 1990]**

A la suite de cette classification, nous présentons quelques-unes des méthodes d'évaluation quantitative ou qualitative de l'erreur humaine afin de comprendre les différentes démarches développées.

- **Méthode TESEO**

La méthode TESEO (Technica Empirica Stuma Errori Operati) permet d'obtenir une estimation rapide de la probabilité d'erreur par une combinaison de cinq facteurs internes et externes. Les valeurs pour chaque facteur sont choisies dans des tables prédéfinies par des experts [Vanderhaegen, 2003].

- **Méthode HCR**

La méthode HCR (Human Cognitive Reliability) estime la probabilité de non réponse aux défaillances de l'opérateur basé également sur des tables prédéfinies.

- **Méthode THERP**

La méthode THERP (Technique for Human Error Rate Prediction) a pour objectif de prédire les probabilités de l'erreur humaine et d'évaluer la dégradation des Systèmes Homme-Machine due à ces erreurs. La méthode prend en compte les défenses internes de l'opérateur humain face aux erreurs en intégrant les probabilités de récupération d'erreur à partir d'un arbre d'évènements [Swain et Guttman, 1983 ; Vanderhaegen, 2003].

- **Méthode APRECIH**

APRECIH (Analyse PREliminaire des Conséquences de l'Infiabilité Humaine) : c'est une approche qui permet de comparer les comportements prescrits avec les comportements réels anticipés [Vanderhaegen, 1999a].

- **Méthode CREAM**

CREAM (Cognitive Reliability and Error Analysis Method) : basée sur la taxonomie de l'erreur humaine, elle peut être utilisée à la fois pour la recherche des causes des erreurs et pour prédire les performances humaines [Hollnagel, 1998].

## - Synthèse des méthodes centrées sur les facteurs humains

THERP, TESEO et HCR sont centrées sur le calcul probabiliste de l'erreur. CREAM s'intéresse davantage aux processus cognitifs en se basant sur un modèle de taxonomie de l'erreur. Elle introduit en plus, la notion de contrôle de la situation par l'opérateur humain. Quant à APRECIH, elle permet de déterminer les modes de dérive comportementale, à partir de l'analyse fonctionnelle du Système Homme-Machine, de l'analyse contextuelle et procédurale ainsi que de l'analyse des tâches.

Les méthodes d'analyse de la fiabilité humaine présentent certaines limites :

- Elles sont d'une part, basées sur les jugements ou tables d'experts pour pouvoir évaluer les erreurs et d'autre part, dépendantes du domaine d'application. En effet, elles nécessitent la connaissance des tables de probabilités associées aux erreurs humaines qui sont difficiles à déterminer et très variables selon les domaines d'étude.
- Elles sont appliquées exclusivement aux erreurs humaines et n'abordent pas le cas des erreurs intentionnelles (violations) des opérateurs [Polet, 2002].
- Des études comparatives ont montrées l'hétérogénéité des résultats obtenus par des équipes d'évaluateurs différentes. De plus, pour une même équipe, les résultats issus des méthodes différentes ne sont pas identiques [Reason, 1990 ; Kirwan, 1997].

Le risque demeure toujours présent, en particulier le risque lié aux défaillances de l'opérateur humain. Toutes ces différentes méthodes d'analyse des risques sont arrivées à maturité ; ils ne sont pas adaptés à l'analyse des risques liés à la variabilité des systèmes, des organisations et des Hommes d'un SHM faisant face à l'imprévu notamment des situations sans précédents.

## **2.5 De la sûreté de fonctionnement à la résilience des systèmes**

Les méthodes d'analyse des événements redoutés centrées sur les facteurs techniques sont essentiellement des méthodes d'évaluation des composants techniques mais pourraient être adaptées à l'analyse des facteurs humains ou organisationnels. Néanmoins, si l'aspect technique est relativement bien maîtrisé, la prise en compte de l'aspect humain reste limitée aux probabilités d'occurrence d'erreurs humaines et aux conséquences liées au comportement de l'opérateur humain pour les méthodes centrées sur les facteurs humains.

La complexité croissante des systèmes actuels, la prise en compte marginale du comportement humain, l'intrication des systèmes techniques et organisationnels entre eux, etc., font que les opérateurs humains se retrouvent souvent face à des situations critiques engendrées par l'occurrence d'événements imprévus. Les opérateurs sont amenés à gérer un ensemble de tâches sous une pression temporelle très forte. Les changements fréquents de dynamique peuvent induire une perte de contrôle, de la maîtrise ou de connaissance de la situation de la part des opérateurs [Villaren *et al.*, 2012]. Dans ce contexte, certains auteurs et groupe de travail préconisent de nouveaux concepts tels que le concept de résilience pour un passage "de la sûreté de fonctionnement à la résilience des systèmes".

Le concept de résilience émerge ainsi dans la maîtrise des risques pour s'intéresser à la capacité à survivre tant aux événements *prévus qu'imprévus* en dépassant, les frontières traditionnelles de la sûreté de fonctionnement. La résilience est alors la capacité d'un système (incluant son utilisation) dans son environnement (au sens large) à assurer ses missions à un niveau acceptable et sûr (à définir au cas par cas selon le système considéré) en maîtrisant/s'adaptant à des situations/événements prévus et/ou non prévus [Gajewski *et al.*, 2008] ; l'imprévu portant sur des événements, des modes d'utilisation ou d'exploitation, ou des environnements difficiles, voire impossibles, à appréhender *a priori*.

L'imprévu désigne un écart significatif entre la réalité perçue par un système ou un acteur et ses attentes (dérive) pouvant avoir des conséquences sur son activité et s'avérant non récupérable par la compréhension ou l'action immédiate. L'évènement imprévu est caractérisé par sa fréquence d'occurrence et par les éventuelles conséquences qu'il peut occasionner sur le système. Une typologie des évènements imprévus peut alors être établie à partir du risque que représente l'évènement imprévu. Le Tableau 4, extrait de la norme CENELEC EN 50126, décrit les critères qualitatifs d'analyse des risques communément utilisés dans le ferroviaire [Legros, 2009 ; Boulanger, 2011]. La fréquence d'occurrence de l'évènement imprévu peut être :

- Probable : l'évènement survient régulièrement ou à plusieurs reprises;
- Rare : l'évènement est susceptible de se produire notamment à un moment donné du cycle de vie du système;
- Improbable : l'évènement est peu susceptible de se produire mais est possible avec une fréquence très irrégulière;
- Invraisemblable : l'évènement est extrêmement improbable, c'est le cas des situations sans précédent.

Quant à la gravité associée à l'occurrence de l'évènement, elle peut être :

- Mineure : les conséquences sont insignifiantes pour le SHM;
- Significative : le système subit des dommages légers et marginaux;
- Critique : le système subit des dommages graves;
- Catastrophique : le système subit des pertes ou des dommages majeurs et sans précédents.

Ces critères permettent de produire une matrice bidimensionnelle «Occurrence-Gravité» à partir d'une vue croisée de la fréquence d'occurrence d'évènements et leurs conséquences éventuelles. Il est alors possible d'attribuer un niveau de risque correspondant à un niveau dit acceptable ou non. En fonction des utilisations ou du domaine d'application, les critères peuvent varier. Dans la méthode AMDEC par exemple, la criticité est quantifiée grâce à une grille de cotation graduée par l'intermédiaire du produit (fréquence x gravité x détectabilité).

**Tableau 4. Critères d'acceptabilité des risques en sûreté de fonctionnement [adapté normes EN 50126].**

		Conséquences de l'évènement			
		Catastrophique	Critique	Significative	Mineure
Fréquence de l'évènement	Invraisemblable	Acceptable	Acceptable	Acceptable	Acceptable
	Improbable	Inacceptable	Indésirable	Acceptable	Acceptable
	Rare	Inacceptable	Inacceptable	Indésirable	Acceptable
	Probable	Inacceptable	Inacceptable	Inacceptable	Indésirable

Du point de vue "conception de système", la zone du Tableau 4 relative au risque jugé "inacceptable", correspond au risque à éliminer. Le concepteur doit mettre en œuvre des systèmes de sécurité ou des plans d'actions nécessaires à la suppression de ces risques pour que son système soit certifié. Les systèmes de sécurité peuvent être la mise en place de barrières. Une barrière est définie comme un obstacle, une obstruction ou une gêne qui peut, soit empêcher l'exécution d'une action ou l'occurrence d'un évènement, soit prévenir ou diminuer l'impact de ses conséquences [Hollnagel, 1999].

Les barrières peuvent être classées selon quatre catégories selon ses caractéristiques (nature, fonctionnement) :

- Les barrières matérielles : barrières physiquement implantées et empêchant l'exécution d'une action ou limitant l'impact les conséquences négatives d'un événement ou d'une menace,
- Les barrières fonctionnelles contraignent l'exécution d'une action par l'existence d'un lien logique et/ou temporel entre les événements. Ce type de barrières peut consister en une suite de conditions nécessaires à la réalisation d'une action, et n'a pas besoin d'être perçu par l'opérateur,
- Les barrières symboliques nécessitent une interprétation afin d'être effectives. Leur perception est donc requise, contrairement aux barrières physiques, puisque ces barrières conduisent l'opérateur humain à effectuer des actions pour éviter l'événement redouté,
- Les barrières immatérielles ne sont pas présentes ou représentées dans la situation de travail mais dépendent des connaissances procédurales de l'agent afin d'être effectives.

Les barrières sont des défenses conçues dans le but d'assurer la sécurité du Système Homme-Machine et de son environnement [Quéva, 2008]. La disposition ou l'organisation des ces barrières est d'autant plus importante que l'étude de la sûreté de fonctionnement dans un Système Homme-Machine nécessite de prendre en compte la violation des différents types de barrières mises en place.

Dans le Tableau 4, nous avons une deuxième zone relative au risque jugé "indésirable" : pour le concepteur, il s'agit d'une zone aux risques tolérables dont le coût en termes de conséquences reste inférieur aux moyens à mettre en œuvre (barrières) pour les réduire. Ces risques deviennent "acceptables" lorsque leur réduction (matérielle, fonctionnelle, technologique, etc.) est impossible.

Dans la zone relative aux risques dits "acceptables" pour le concepteur, la fréquence d'occurrence très faible des événements fait que ces risques ne sont jamais pris en compte lors de la conception du système. En revanche, pour l'opérateur, ces risques demeurent d'autant plus que les conséquences peuvent être critiques voir catastrophiques. Nous nous intéressons particulièrement aux *situations sans précédent engendrées par les événements dont la fréquence d'occurrence est invraisemblable et aux conséquences a minima critiques (i.e., critiques voire catastrophiques)*. Les opérateurs d'un SHM face à ces situations devront développer des capacités de résilience pour réagir et pour récupérer de ces perturbations. La résilience devrait donc permettre au système de gérer l'occurrence de ces événements sans précédents. Le reste des situations engendrées par les événements dont la fréquence d'occurrence est invraisemblable/improbable ou rare mais dont les conséquences ou dommages subis par le système ne sont que marginaux (significative ou mineure) pourront faire l'objet de futures études.

Dans la section suivante, nous abordons la notion de résilience au travers un état de l'art.

### 3 Le concept de résilience

L'étymologie latine du terme résilience est composée du préfixe *re* qui signifie « en arrière » et du verbe *salire* qui signifie « sauter »; par suite *re, salire* signifiant littéralement « sauter en arrière », d'où « rebondir », « résister » (au choc, au changement)». Les définitions de la résilience relatives aux différents domaines d'applications présentent ainsi des points communs hérités essentiellement de l'étymologie du terme résilience.

Au début du XXème siècle, le terme résilience est utilisé pour caractériser la résistance aux chocs des matériaux [Charpy, 1901]. La résilience désigne alors la capacité d'un métal à résister à la rupture et à reprendre sa forme initiale à la suite d'un choc. Le domaine de l'écologie s'est ensuite intéressé à la résilience à partir de Holling afin de caractériser les phénomènes dynamiques dans des écosystèmes [Holling, 1973]. La résilience est désormais transposée dans différents domaines scientifiques : en psychologie, en psychiatrie [Cyrulnik, 2000 ; Goussé, 2005], en sociologie, en économie, en biologie [Martin, 2005; Orwin et Wardle, 2004; Pérez-España et Arreguín-Sánchez, 2001], en informatique [Chen *et al.*, 2007; Nakayama, 2007; Malcuit *et al.*, 1995], en automatique [Numanoglu, 2006; Zieba *et al.*, 2007].

#### 3.1 Les principaux domaines d'application de la résilience

##### - La résilience dans les sciences des matériaux

La résilience désigne la qualité intrinsèque des matériaux qui réside de leur capacité de déformation élastique (le matériau retrouve son état initial à la suite du choc) et plastique (le matériau ne retrouve pas son état initial à la suite du choc ou de la déformation subie). La résilience est fonction de la capacité du matériau à absorber des chocs ou à retrouver son intégrité après un choc. La résilience est alors liée à la rupture ou non d'un matériau : le matériau possède alors une grande résilience s'il résiste aux chocs.

La résilience a été introduite dans les sciences des matériaux à la suite des travaux de Charpy : le test, encore communément appelé l'essai de résilience Charpy, consiste à rompre un barreau entaillé (ou éprouvette) de matériau à l'aide d'un « mouton pendule » [Charpy, 1901]. La machine est munie d'un index permettant de connaître la hauteur du pendule au départ ainsi que la position la plus haute que le pendule atteindra après la rupture de l'éprouvette comme illustré sur la Figure 4. L'équation 1 présente la mesure de la résilience ( $k$ ) caractérisée par l'énergie absorbée (en négligeant les frottements), exprimé en joules par  $m^2$  ou  $cm^2$  [Collin, 1999] :

$$\text{résilience } (K) = m \times g \times (h - h') \quad (1)$$

Avec :

$m$  = masse du mouton-pendule [kg]

$g$  = Accélération terrestre. [ $m\ s^{-2}$ ] (9.80665)

$h$  = hauteur du mouton-pendule à sa position de départ [m]

$h'$  = hauteur du mouton-pendule à sa position d'arrivée [m]

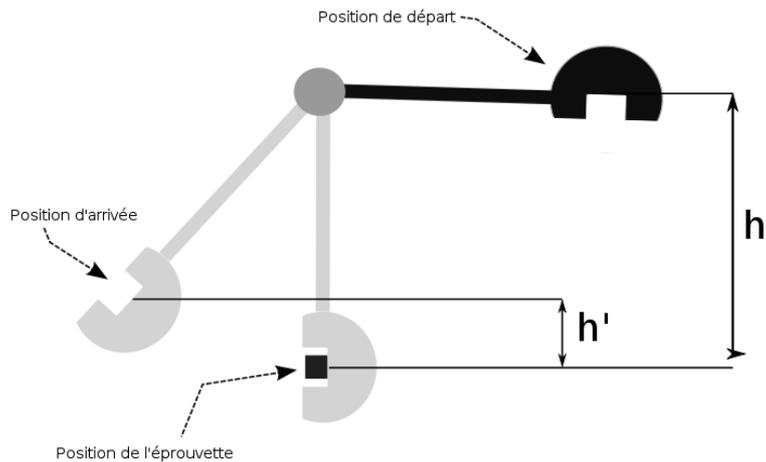


Figure 4. Mouton-pendule pour la mesure de la résilience des matériaux

### - La résilience dans le domaine de l'écologie

L'écologie a fortement contribué au développement de la recherche sur la résilience. Le domaine de l'écologie s'est intéressé à la résilience à partir des travaux de Holling [1973] afin de caractériser les phénomènes dynamiques dans des écosystèmes. Dans la littérature, la résilience est souvent associée à la notion de stabilité écologique. La stabilité écologique est définie comme la capacité à continuer de fonctionner sans changement après réception d'une agression ou d'une perturbation (persistance), de subir de faibles changements après cette perturbation (variabilité) et de revenir à l'état d'origine après la fin de la perturbation (résilience) [Pérez-España et Arreguín-Sánchez 2001]. Néanmoins, en fonction de l'état du système et des perturbations subies, deux définitions de la résilience sont généralement retenues : la résilience *technique* (en anglais « *engineering resilience* ») et la résilience *écologique* (en anglais « *ecological resilience* ») [Holling, 1973; Martin, 2005].

La résilience *technique* est relative au temps mis par le système pour retrouver son état d'équilibre initial après l'occurrence d'une perturbation majeure [Pimm, 1984; Holling 1996]. Par exemple, la résilience d'un écosystème forestier représente le temps qui lui est nécessaire pour se reconstituer suite à un incendie. Plus le retour à l'équilibre est rapide, plus l'écosystème est résilient. La résilience *écologique* définit la résilience comme l'amplitude maximale des perturbations qu'un système écologique peut supporter sans que son fonctionnement ne soit affecté [Holling 1973; Holling 1996; Ludwig *et al.*, 1997]. Par exemple, pour les espèces menacées, la résilience est relative à la limite ou au seuil d'extinction de cette espèce.

Dans la première définition, c'est le retour au point d'équilibre initial du système qui est observé afin de qualifier la résilience. La deuxième définition se focalise sur les conditions qui permettent, après des instabilités, le passage à d'autres points d'équilibre alternatifs autre que le point d'équilibre initial. En biologie, la résilience est développée dans la théorie de la viabilité, *i.e.* la capacité d'un écosystème ou d'une espèce à survivre ou à récupérer un fonctionnement et un développement normal après avoir subi une perturbation ou une agression [Martin, 2005].

Pérez-España et Arreguín-Sánchez [1999; 2001] proposent une mesure de la stabilité écologique à partir des mesures de la persistance, de la résistance et de la résilience (Figure 5) :

- La persistance est le temps au-delà duquel la perturbation est considérée comme inacceptable. On considère alors que la perturbation a un impact significatif sur le fonctionnement du système.
- La résistance est calculée comme l'inverse de l'amplitude maximale (ou l'ampleur du changement) générée par une perturbation.
- La résilience est donnée par la tangente inverse du ratio entre la résistance et le temps de retour à un état d'équilibre.

Dans l'équation de la résilience (Equation 2), la tangente inverse, exprimée en degrés, a été utilisée pour restreindre les valeurs dans une gamme de 0-90, où 90° indique un système fortement résilient et 0°, un système non résilient.

$$Résilience = \tan^{-1} \left( \frac{1}{\frac{Amp_{max}}{T_{Rec}}} \right) \quad (2)$$

L'indicateur proposé estime la résilience sur un intervalle ( $T_{REC}$  ou temps de récupération) de temps où la perturbation a un impact sur le fonctionnement du système. Il ne prend pas en compte l'évolution générale du système. Pour une application aux Systèmes Homme-Machine, il y aurait alors un manque de mesures instantanées de la résilience.

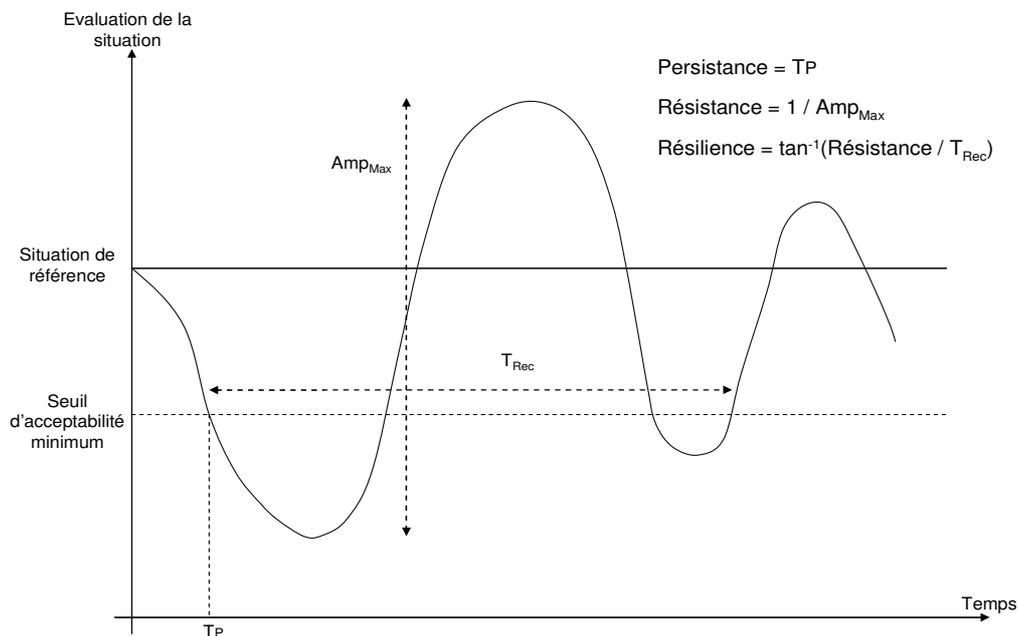


Figure 5. Mesures de la persistance, résistance et résilience [Pérez-España et Arreguin-Sanchez 2001]

[Orwin et Wardle, 2004] proposent un indice de résistance et un indice de résilience appliqués aux milieux naturels. La Figure 6 présente les principes de mesure de la résistance et de la résilience :

- La résistance est liée à l'amplitude maximale causée par une perturbation.
- La résilience est liée à la vitesse de récupération de cette perturbation.

La résilience du système (Figure 6) au temps  $T_x$  est donnée par l'équation (3) :

$$\text{Résilience} = \frac{2 * |D_0|}{|D_0| + |D_x|} - 1 \quad (3)$$

Où

$D_0$  (Figure 6) est l'amplitude maximale générée par une perturbation. C'est la différence à  $T_0$  entre le niveau dit de contrôle  $C_0$  et le niveau  $P_0$  à la fin de la perturbation.  $D_x$  est l'amplitude de la perturbation au temps  $T_x$ , temps de mesure de la résilience.

L'indicateur de résilience (Equation 3) est borné par -1 et +1. Une valeur de 1 au moment de la mesure indique une récupération complète (résilience maximale), et des valeurs plus basses indiquent un ralentissement du taux de récupération. L'indicateur ne prend pas en compte le temps de récupération du système, or deux systèmes subissant les mêmes amplitudes de perturbations mais avec des temps de récupérations différentes  $\Delta t_1$  et  $\Delta t_2$  ne peuvent avoir le même niveau de résilience.

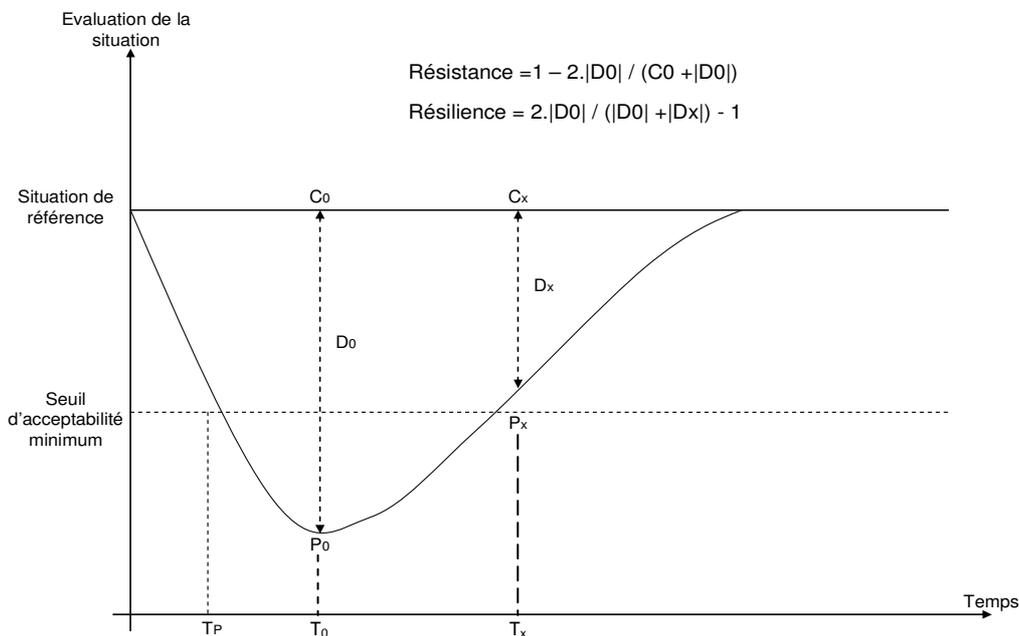


Figure 6. Mesures de la résistance et de la résilience [Orwin et Wardle 2004]

Dans le cadre de l'étude des sols, Seybold *et al.*, dans [Seybold *et al.*, 1999] proposent une approche pour estimer la résilience expérimentalement en mesurant le taux, Equation (4), et le degré de récupération, Equation (5). La Figure 7 présente les effets d'une perturbation sur l'état du sol dans le cadre de la mesure de la résilience.

$$\text{Taux de récupération} = \frac{d \left[ \frac{(B - C)}{(A - C)} \right]}{dt} \quad (4)$$

$$\text{Niveau de récupération} = \frac{(B - C)}{(A - C)} \quad (5)$$

Avec :

- A est la capacité optimale de fonctionnement du sol avant la perturbation soit 100%.
- B est niveau de récupération à un à état d'équilibre stable de fonctionnement du sol, ce niveau est un niveau dégradé inférieur au niveau optimal et dépend du système. Ce niveau peut être fixé ici à 90% comme sur l'exemple de la Figure 7.
- C est le niveau de fonctionnement du sol immédiatement après l'apparition de la perturbation, ce niveau dépend de la nature de la perturbation. Plus la perturbation est forte (évènement sans précédent) plus ce niveau est faible.

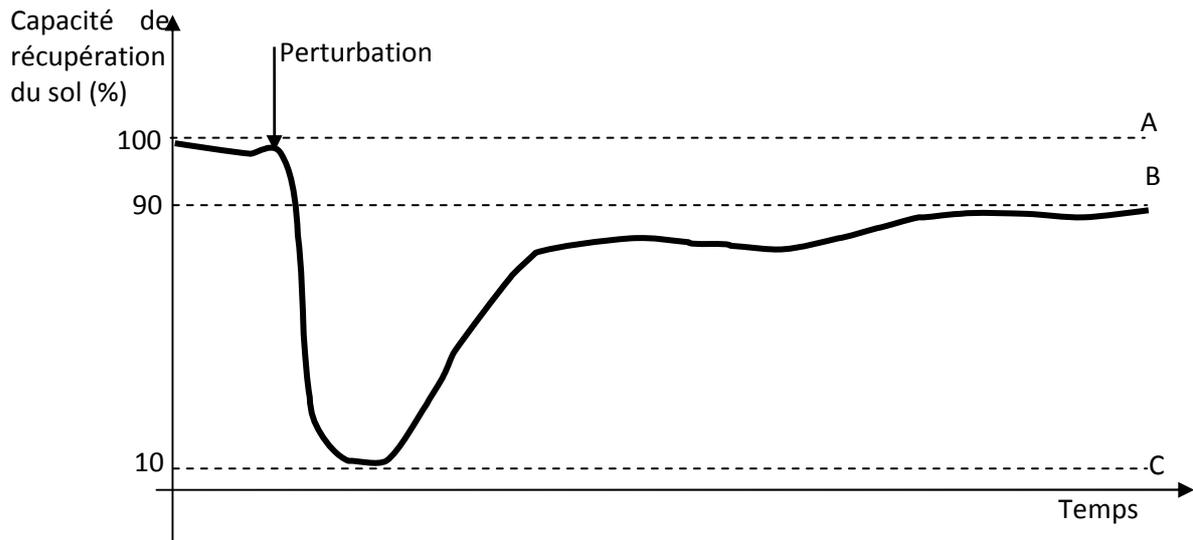


Figure 7. Effet d'une perturbation sur l'état du sol : résilience du sol (adapté de [Seybold *et al.*, 1999])

### - La résilience en psychologie

En psychologie, la résilience apparaît en théorie de l'invulnérabilité, *i.e.* la capacité d'un individu à surmonter un traumatisme ; l'affronter, se reconstruire et s'en sortir encore plus fort.

Werner et Smith ont été parmi les premiers scientifiques à utiliser le terme de résilience dans leurs travaux [Werner et Smith, 1982]. Les travaux consistaient à étudier sur 30 ans, le devenir de 698 enfants issus de milieux très pauvres et vivants avec des parents sans emploi, alcooliques ou malades mentaux. Un tiers de ces enfants "s'en sont sortis" grâce à leurs qualités individuelles ou à des opportunités de leur environnement ; ce groupe d'enfants a été caractérisé de résilient.

En France, Cyrulnik reprend et développe le concept de résilience à partir de l'observation des survivants des camps de concentration, puis de divers groupes d'individus victimes de maltraitements dont des enfants orphelins ou des enfants de rues : « la résilience c'est la reprise du développement après un traumatisme » [Cyrulnik, 2002].

Plus récemment, pour Békaert *et al.*, un individu résilient présente un quotient intellectuel élevé, un sentiment de sa valeur propre, de bonnes capacités d'adaptation relationnelles et d'empathie, le sens de l'humour, la capacité d'anticiper et de planifier, l'autonomie et l'efficacité dans ses rapports à l'environnement [Békaert *et al.*, 2011]. Quelques instruments d'évaluation de la résilience psychologique existent. Ils sont pour la plupart construits sur le développement de questionnaires psychométriques à base d'items (questions) mettant en évidence les caractéristiques propres à chacun de ces outils de mesure (ancrage théorique, types de facteurs de protection, nombres de questions...). Une échelle de Likert à 5 ou 7 choix de réponse, associé au questionnaire, permet alors de quantifier la résilience.

## - La résilience en économie

La résilience a été abordée dans le domaine de l'économie notamment après les trois chocs pétroliers (1973, 1978 et 2008) ainsi que les crises financières ou économiques.

La résilience d'une économie ou d'une zone économique est sa capacité à surmonter rapidement des chocs et perturbations économiques (*e.g.*, chocs pétroliers, crises financières) et à revenir sur la trajectoire de croissance après avoir subi un choc. La résilience est également employée dans le monde anglo-saxon pour désigner la capacité de l'économie à résister au double choc du changement climatique et du pic pétrolier [Hopkins, 2008]. Dans le contexte de l'entreprise notamment des grands groupes tel que General Motors, Fiksel définit la résilience comme la «capacité d'une entreprise à survivre, à s'adapter et à se développer dans le contexte des turbulences économiques" [Fiksel, 2006]. Il s'agit donc de faire face aux différentes perturbations économiques comme la « crise de la dette de la zone euro » actuelle.

Cox *et al.* dans [Cox *et al.*, 2011] proposent un indicateur de la résilience relative à la "Direct Static Economic Resilience" (DSER) ou résilience statique directe (équation 6). Cette résilience définit le niveau individuel d'une firme ou d'une industrie et correspond à l'équilibre économique partiel, capacité de se développer dans le contexte des turbulences économiques critiques.

$$DSER = \frac{\% \Delta DY^m - \% \Delta DY}{\% \Delta DY^m} \quad (6)$$

Où  $\% \Delta DY^m$  est le pourcentage maximal de changement de la production, et  $\% \Delta DY$ , le pourcentage estimé de changement de production.

C'est une mesure de la production exprimée en pourcentage de variation entre un résultat attendu (100%) et le résultat mesuré. Cette méthode se base uniquement sur la production.

## - La résilience en informatique

La résilience a été également introduite dans le domaine de l'informatique pour qualifier les performances des réseaux informatiques. De nombreux équipements sont interconnectés pour assurer les échanges d'informations, la résilience est la capacité d'un système ou d'une architecture réseau à continuer de fonctionner correctement en dépit de pannes (ou défauts) d'un ou de plusieurs éléments constitutifs. La résilience peut alors être assimilée à la tolérance aux pannes [Luo et Yang, 2002; Colin, 1999]; ou à la "system resiliency" qui caractérise des systèmes capables de maintenir un niveau de fonctionnement minimal malgré la défaillance d'un ou plusieurs composants [Collin, 1999].

Ces trois approches informatiques de la résilience pourraient se confondre à la notion de fiabilité des réseaux. La fiabilité maximale est atteinte lorsque tous les nœuds du réseau sont connectés et fonctionnels. Le fonctionnement du système est normal et le niveau de performance optimale. Dans la pratique, un réseau peut cependant être fonctionnel alors que certains nœuds sont défectueux.

La résilience est relative au pourcentage d'informations transmises bien arrivées. La quantité d'informations reçues doit être suffisante pour permettre au réseau de continuer à fonctionner malgré les pertes dues aux éléments défectueux. Soit ( $V$ ) la quantité d'information transmise (en octet, kilo-octet, giga-octet, etc.) et ( $V_{\text{perte}}$ ) celle des informations perdues, la résilience est alors définie dans l'équation 7 :

$$\text{Résilience} = \frac{V - V_{\text{perte}}}{V} \quad (7)$$

Pour Luo et Yang [2002], la mesure de la résilience donnée par l'équation 8, est liée avec la vitesse de rétablissement du réseau informatique ( $\Delta t$ ) après une perturbation; soit ( $T_p$ ) l'instant d'occurrence de la perturbation et ( $T_r$ ) l'instant de rétablissement du réseau (plus de perturbation), la résilience est alors :

$$\text{resilience} = T_r - T_p \quad (8)$$

Cet indicateur ne prend pas en compte l'effet de la perturbation sur le système, alors que plus un système s'adapte à des perturbations d'amplitude importante, plus ce système est résilient.

L'approche informatique de la résilience ne couvre qu'un aspect partiel du concept de résilience, à savoir qu'une baisse des performances ou qu'un fonctionnement non optimal de la totalité du réseau sont tolérés à condition qu'un niveau suffisant de performances soit délivré.

### - La résilience dans les systèmes sociotechniques

La résilience a été récemment introduite dans le domaine de la sécurité des systèmes sociotechniques. En effet, une des premières publications sur la résilience appliquée à l'ingénierie a été proposée dans "Resilience Engineering: Concepts and Precepts" [Hollnagel *et al.*, 2006]. Les concepts de base de l'ingénierie de la résilience y sont développés et quelques définitions de la résilience ont été proposées.

Dans [Wreathall, 2006], la résilience est définie comme "*la capacité d'une organisation (système) à maintenir, ou retrouver rapidement un état stable, lui permettant de continuer à fonctionner pendant et après une perturbation majeure ou en présence d'un stress continu*". Cette définition est ensuite étendue au management de la sûreté mais la résilience est alors vue comme une propriété intrinsèque de l'organisation [Hollnagel, 2006]. Une relation très forte peut alors être établie entre la sûreté et la résilience.

Certains auteurs insistent sur certaines spécificités du concept de résilience : propriétés intrinsèques du système, compromis entre sécurité et performance du système, capacité d'anticipation et de gestion des risques, etc. Une autre spécificité est relevée dans [Zhang et Lin, 2010; Wang *et al.*, 2010; Gao, 2010]: "*la résilience désigne la capacité d'un système ayant subi des dommages partiels à maintenir le niveau de fonctionnement désiré*". Cette définition considère la résilience comme une propriété du système émergente après des dommages (*i.e.*, la capacité du système à récupérer un fonctionnement acceptable malgré les dommages subis par sa structure physique).

[Cimellaro *et al.*, 2010] évaluent la résilience d'un système relative à ses performances antisismiques : pertes économiques, pertes humaines, temps de récupération, etc. La résilience est donc liée à :

- La capacité du système à résister à l'impact du séisme, en termes de dégâts ou la perte de fonctionnalité qui résulte de l'événement; et
- La vitesse de récupération du système à un niveau acceptable de fonctionnalité après l'occurrence du séisme.

Si on considère un réseau d'infrastructures (approvisionnement en eau, en électricité, etc.), une combinaison de ces deux facteurs permet d'établir une mesure quantitative de la résilience du système en termes de perte de qualité de service (notée  $Q(t)$  exprimée en %) durant un séisme donnée par l'équation 9 :

$$\text{Résilience}(R) = \int_{t_0}^{t_1} [100 - Q(t)] dt \quad (9)$$

Avec ( $t_0$ ) début de la perturbation (séisme) et ( $t_1$ ) fin de la perturbation.

Dans la même logique, [Luzeaux, 2009] présente dans l'équation 10, une mesure de la résilience des systèmes sociotechniques de défense relative à la qualité de fonctionnement (notée  $Q(t)$  exprimée en %);

$$Résilience(R) = \int_{[t_1, t_2]} \frac{Q(t)}{t_2 - t_1} \quad (10)$$

Avec ( $t_1$ ) début de la perturbation et ( $t_2$ ) fin de la perturbation.

Ces indicateurs chiffrés (équation 9 & 10) n'évaluent qu'un aspect partiel de la résilience puisqu'ils ne sont relatifs qu'à la qualité ou à la perte de fonctionnement. La résilience d'un SHM dépend de plusieurs facteurs de performances affectant *a priori* son état de fonctionnement. Une différence peut être notée entre les approches existantes pour la résilience écologique et les approches relatives à la résilience dans les systèmes sociotechniques. Les mesures de la résilience prennent comme référence le retour du système à l'état précédent la perturbation. Dans les systèmes sociotechniques, le système est considéré comme résilient s'il est capable d'être dans un état différent de celui précédent la perturbation mais garantissant la continuité du fonctionnement.

Les indicateurs présentés dans le domaine des systèmes sociotechniques, sont calculés sur la base de mesures de performance du système. Pour un SHM plus complexe, la mesure de la résilience devrait prendre en compte les critères de performance affectant l'état de SHM notamment la contribution de l'opérateur humain.

### **3.2 Synthèse des domaines d'application de la résilience**

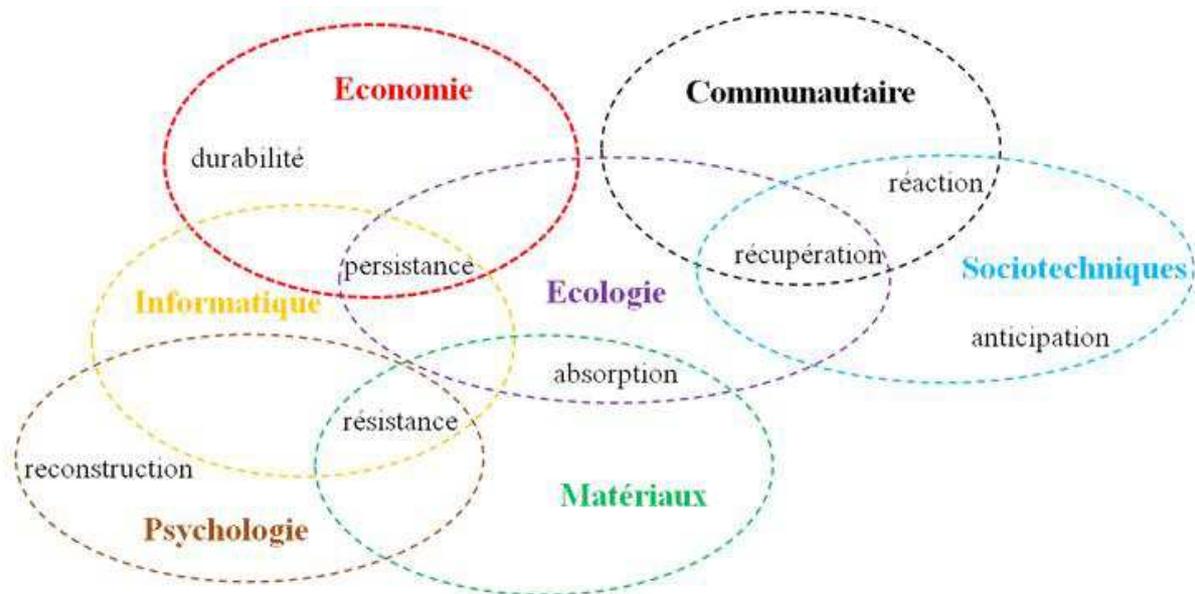
Le terme résilience est devenu pluridisciplinaire après sa transposition dans les divers domaines scientifiques. Dans le Tableau 5 sont récapitulées les principales définitions, caractéristiques et mesures de la résilience dans différentes communautés.

La question est alors de savoir si la résilience est enrichie par cette variété disciplinaire ou bien complexifiée par celle-ci [Lhomme *et al.*, 2010]. A travers son application dans les divers champs disciplinaires, le concept de résilience a connu une «évolution» tendant à différer du sens étymologique, puisque dans chaque discipline, la résilience est associée à des notions plus ou moins voisines. Il en résulte un nuage de sens de la résilience.

Tableau 5. Synthèse des domaines d'application de la résilience

Auteurs	Communauté	Définitions de la résilience	Mesures de la résilience
Charpy, 1901	sciences des matériaux	résistance aux chocs des matériaux	$résilience (K) = m \times g \times (h - h')$
Martin, 2005	biologie	viabilité, <i>i.e.</i> la capacité à survivre	-
Werner, 1982 Békaert <i>et al.</i> , 2011	psychologie	invulnérabilité, <i>i.e.</i> la capacité d'un individu à surmonter un traumatisme	questionnaire psychométrique à base d'items (+ échelle de Likert)
Hopkins, 2008 Fiksel, 2006 Cox <i>et al.</i> , 2011	économie	capacité à surmonter les turbulences économiques critiques ( <i>e.g.</i> , chocs pétroliers, crises financières).	$DSEER = \frac{\% \Delta DY^m - \% \Delta DY}{\% \Delta DY^m}$
Luo et Yang, 2002; Colin, 1999	informatique	tolérance aux pannes informatiques	$Résilience = T_r - T_p$ $Résilience = \frac{V - V_{perte}}{V}$
Hollnagel <i>et al.</i> , 2006 Cimellaro <i>et al.</i> , 2010 Luzeaux, 2009	systèmes sociotechniques	capacité d'un système à maintenir, ou retrouver rapidement un état stable, lui permettant de continuer à fonctionner pendant et après une perturbation majeure.	$Résilience(R) = \int_{t_0}^{t_1} [100 - Q(t)] dt$ $Résilience(R) = \int_{[t_1, t_2]} \frac{Q(t)}{t_2 - t_1}$
Pérez-España et Arreguín-Sánchez 2001 Pimm, 1984; Holling 1973, 1996; Ludwig <i>et al.</i> 1997	écologie	<i>engineering resilience</i> : temps mis par le système pour retrouver son état d'équilibre global.  <i>ecological resilience</i> : amplitude maximale des perturbations qu'un système écologique peut supporter sans que son fonctionnement ne soit affecté.	$Résilience = \tan^{-1} \left( \frac{1}{\frac{Amp_{max}}{T_{Rec}}} \right)$ $Résilience = \frac{2 *  D_0 }{ D_0  +  D_x } - 1$

La Figure 8 présente les notions associées à la résilience dans les différents domaines. La science des matériaux associe la résilience à des notions comme l'absorption (de chocs) et la résistance (aux chocs). L'absorption est relative à l'aptitude du matériau à dissiper l'énergie du choc, tandis que la résistance est l'aptitude du matériau à s'opposer au passage (circulation) de cette énergie. L'écologie définit la résilience grâce aux notions d'absorption (de perturbations), de persistance et de récupération (après une perturbation). En psychologie, la résilience est associée aux notions de résistance (au traumatisme) et de reconstruction (pour "s'en sortir"). La résilience en économie est associée aux notions de persistance et de durabilité (développement économique durable). En informatique, la résilience est alors associée aux notions de persistance ou de résistance (tolérance aux pannes).



**Figure 8. Résilience et notions associées dans différentes disciplines (adapté de [Lhomme *et al.*, 2010])**

La résilience a été reprise et adaptée dans les différents domaines d'application, chaque définition mettant en exergue des traits spécifiques à la discipline concernée. Il n'y a pas de définition de référence. Néanmoins, la résilience définit la capacité d'un système (ou d'une organisation, d'un organisme) à faire face à une perturbation que certains qualifient de majeure, de critique ou désastreuse. Une telle perturbation est un événement imprévu qui entraîne un dysfonctionnement du système.

Dans le cadre des Systèmes Homme-Machine, l'opérateur humain et le système automatisé peuvent être tous deux des sources de résilience. La résilience du système peut aussi provenir de la coopération existant entre cet opérateur humain et le système automatisé [Ziéba, 2009]. Les systèmes, notamment les SHM, sont régulièrement soumis à des perturbations externes et/ou internes. Cependant, l'ingénierie de conception de ces SHM qui essaie d'anticiper et de résister à ces perturbations, peut être vulnérable à des facteurs critiques ou imprévus. La composante technique de ces systèmes, avec des taux de défaillance acceptable de l'ordre de  $10^{-9}$  étant relativement bien développée, c'est pour la composante humaine des systèmes, qu'il s'agit de prendre en considération les activités quotidiennes des opérateurs qui rendent le système sûr et de ne plus considérer uniquement l'opérateur humain comme un acteur faillible dans les études de sécurité. Il est indispensable de prendre en compte sa forte capacité d'anticipation et d'adaptation [Belmonte, 2008]. Grâce à ses expériences et à sa liberté d'action, l'opérateur peut modifier son comportement pour faire face aux menaces. Les opérateurs humains sont alors considérés comme des sources imprévisibles de fiabilité et/ou d'erreurs donc de résilience.

Nous nous basons sur la typologie des situations imprévues définie précédemment pour proposer une définition de la résilience dans les SHM :

La résilience est la **capacité** d'un système (homme, machine, environnement) à **recupérer** ou à **s'adapter positivement** face à des **situations critiques**.

La synthèse des diverses définitions du concept de résilience nous a permis d'établir une typologie des situations imprévues afin d'énoncer une définition de la résilience d'un Système Homme-Machine. Dans les différents domaines d'application de la résilience présentés (l'écologie, les systèmes sociotechniques, etc.), la résilience n'est souvent considérée que sous un aspect partiel rejoignant en partie les notions de stabilité ou de robustesse. La question est alors de savoir ce qu'apporte le concept de résilience par rapport à la stabilité, ou à la robustesse d'un système.

### **3.3 Les caractéristiques de la résilience**

De la littérature consacrée à la définition de la résilience concernant les systèmes sociotechniques, nous retenons que la résilience a été adaptée dans les divers domaines se rapprochant parfois de certains concepts déjà existants comme la stabilité ou robustesse. Les travaux de l'ingénierie de la résilience ou "resilience engineering" sont pour la plupart purement conceptuels. Il est donc nécessaire de les formaliser et de les rendre plus opérationnels. Ce problème se pose particulièrement si l'on tente d'appliquer le concept de résilience à un Système Homme-Machine. Dans cette section, nous positionnons la résilience par rapport à des concepts comme la stabilité, la robustesse ou la résistance.

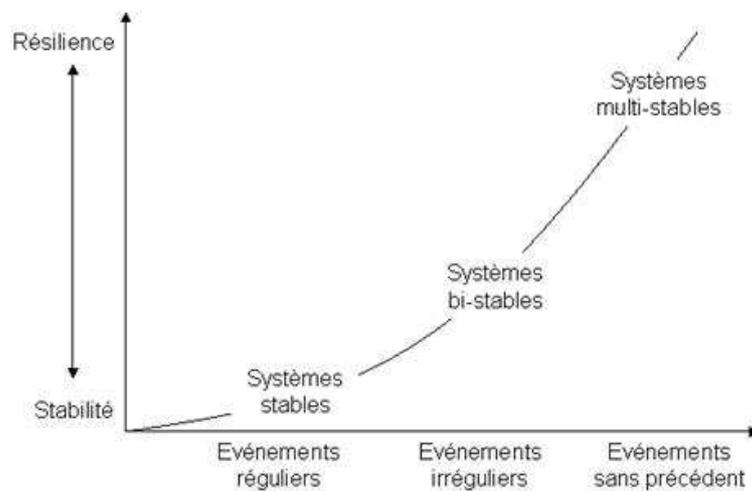
#### *Résilience et stabilité*

Ce paragraphe positionne les concepts de la résilience et de la stabilité. La relation entre la résilience et la stabilité peut être faite d'une part en fonction de la nature et de la fréquence des événements rencontrés, et d'autre part en se basant sur les systèmes dits stables, bi-stables et multi-stables [Lundberg *et* Johansson, 2007]. La Figure 9 présente la relation entre la stabilité et la résilience face à différents types d'événements. La stabilité est la capacité d'un système à répondre à un événement régulier en assurant le fonctionnement du système dans un état maîtrisé par rapport à un objectif donné : le système est stable par rapport à cet objectif. La résilience est relative au management des événements sans précédents. Pour les événements irréguliers, il existe un certain équilibre (balance) entre stabilité et résilience. La résilience traduit la capacité des systèmes à répondre efficacement à de fortes perturbations. La recherche d'un nouvel état d'équilibre est rendue nécessaire par la possible occurrence d'événements imprévisibles et menaçants. Trois types d'événements sont donc distingués suivant leur fréquence d'occurrence [Westrum, 2006] :

- Le système est exposé à des *événements réguliers*. Ces événements sont bien connus de par leur fréquence d'occurrence élevée et il existe des moyens de défense préalablement conçus (parades, barrières, etc.). Le système est dit stable par rapport à un état prédéfini vers lequel il tend à revenir en maîtrisant l'occurrence de ces événements (*i.e.*, panne moteur récurrente).
- Le système est exposé à des *événements irréguliers*. Ce type d'événements n'a pas été pris en compte dans la conception du système au regard de leur faible probabilité d'occurrence. Il s'agit d'événements imprévus et leur gestion n'a pas été planifiée. L'occurrence de telles situations permet de tester les capacités du système à s'auto-organiser et à répondre efficacement à une situation de crise [Ziéba, 2009]. Si le système est bi-stable, un basculement vers un état de fonctionnement dégradé est alors possible. La phase de transition entre ces deux états correspond à un compromis qui doit être trouvé entre stabilité et résilience.

- Le système est confronté à un *événement sans précédent*. Ce type d'événements paraît tellement inconcevable qu'il pousse les éléments du système (hommes, machines, organisations) en dehors de leur expérience collective. Il est impossible de les prendre en compte par anticipation dans la conception du système. Le système multi-stable étend alors le principe de transition à une série d'états permettant de gérer l'occurrence d'événements sans précédent. La résilience de ce type de systèmes vise principalement à gérer les transitions vers d'autres états de fonctionnement, de performance éventuellement moindre ou dégradée, en cas de modification de paramètres du système.

La gestion de ces types de menaces nécessite des demandes différentes en termes d'adaptation et de résilience [Westrum, 2006 ; Hale *et* Heijer, 2006]. Une organisation ou un système résilient dans une situation donnée n'est pas nécessairement résilient dans une autre situation. La résilience est donc comme une capacité d'adaptation permettant de retrouver un état d'équilibre alors que le système a été confronté à une situation imprévue fortement perturbatrice.



**Figure 9. Relation entre stabilité et résilience en fonction des types d'événements [Lundberg et Johansson, 2007]**

### *Résilience et Résistance*

La relation entre la résilience et la résistance peut être établie en considérant les comportements d'un système face à des perturbations [Fiksel, 2003; Ziéba, 2009]. Fiksel propose une interprétation simplifiée des lois de la thermodynamique caractérisant le comportement de différents types de systèmes. Pour ces systèmes, l'état de stabilité correspond au niveau d'énergie le plus faible, *i.e.* au point d'équilibre du système. La Figure 10 présente ces différents comportements du système :

- Le premier système est un système dit résistant, capable de fonctionner sous des perturbations de faible amplitude mais retournant rapidement à un état d'équilibre. Ce comportement est caractéristique d'un système fortement contraint.
- Le second système est un système robuste capable de récupérer de perturbations couvrant un spectre plus large et tend à retrouver graduellement son état d'équilibre. Ce type de système présente généralement des caractéristiques d'adaptation et d'évolution.
- Le dernier système est d'autant plus résilient qu'il est capable de tolérer de plus importantes perturbations. Ce type de systèmes est en effet capable de s'adapter aux perturbations reçues en modifiant sa structure et/ou son fonctionnement afin

d'atteindre un nouvel état d'équilibre, différent de l'état initial. Le système résilient possède alors des capacités de résistance et de robustesse.

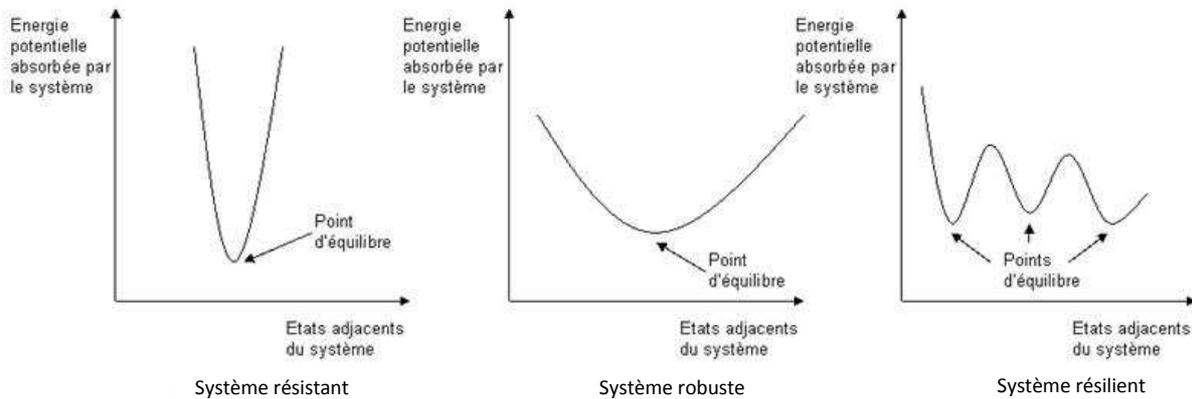


Figure 10. Comportement de systèmes résistants, robustes et résilients [Fiksel 2003]

### Résilience et Robustesse

Dans le domaine de l'automatique, un système est dit robuste si son fonctionnement est peu modifié par des perturbations (paramètres extérieurs non maîtrisés, *e.g.*, les bruits tels que le vieillissement des composants, le changement d'environnement, etc.) ou des erreurs sur le modèle d'étude du système. Par exemple, les paramètres de la fonction de transfert (modèle) de certains procédés peuvent varier en fonction de la température ambiante ou de l'humidité ambiante : le système robuste doit être capable d'assurer sa tâche même avec ces changements afin de s'adapter aux usages non prévus (dérive de production, vieillissement mécanique, environnements extrêmes...).

Le concept de résilience tend à se confondre avec celui de la robustesse. Dans le cadre des systèmes sociotechniques, et plus précisément dans les Systèmes Homme-Machine, le concept de résilience peut être rapprochée de celle de robustesse [Pavard *et al.*, 2006; Steen et Aven, 2011].

Le terme de système robuste peut être employé pour caractériser un système capable de gérer des menaces irrégulières [Jen, 2003; Ziéba, 2009]. Les menaces sans précédent rendent quant à elles nécessaires la conception des systèmes résilients capables d'atteindre différents domaines de stabilité selon la définition des systèmes multi-stables [Lundberg et Johansson 2006].

### Synthèse

Le Tableau 6 recense les caractéristiques spécifiques aux systèmes stables, résistants, robustes et résilients.

Tableau 6. Récapitulatif des caractéristiques des systèmes stables, résistants, robustes et résilients [Ziéba, 2009].

	Systèmes résistants ou stables	Systèmes robustes ou bi-stables	Systèmes résilients ou multi-stables
Vitesse de récupération	Rapide	Moyenne	En fonction du domaine de stabilité considéré
Perturbations gérées	Restreintes	Importantes	Importantes
Capacité d'adaptation	Faible	Moyenne	Importante
Domaines de stabilité	Unique	Limités	Nombreux

La résilience doit être considérée comme un concept émergent nécessitant une approche proactive de l'activité du système afin de contribuer à la gestion des risques. Dans les Systèmes Homme-Machine, la composante humaine, par ses capacités d'adaptation, peut apparaître comme le dernier rempart face à un possible désastre dû à l'occurrence d'un événement sans précédent.

Le système résilient doit alors combiner des caractéristiques d'anticipation, de réaction et de récupération face à l'imprévu [Hollnagel, 2006]. La Figure 11 présente les propriétés d'une organisation résiliente; ces propriétés de résilience prennent en compte les interactions dans un système complexe et le comportement du système face à une perturbation :

- Anticipation : reposant sur la proactivité de l'organisation caractérisée par l'analyse constante de son état afin de se situer par rapport à un domaine de fonctionnement et de déterminer si elle est capable de réagir à un événement imprévu [Ziéba, 2009]. La proactivité contribue alors à l'anticipation voire à l'évitement d'un événement imprévu. Le système doit identifier et interpréter correctement les signaux précurseurs notamment les signaux faibles (symptômes, tendances suspectes, etc.) [Rigaud, 2011].
- Réaction : lors de l'occurrence d'un événement imprévu, l'organisation doit être capable diagnostiquer et d'évaluer la situation courante, et de se réorganiser, ce qui traduit la réactivité de l'organisation.
- Récupération : Certains événements imprévus ne peuvent cependant être évités et nécessitent alors une interaction entre les agents de l'organisation afin d'élaborer des alternatives de fonctionnement permettant de récupérer de l'occurrence de ces événements imprévus.

La Figure 11 est une interprétation temporelle de la résilience. Le système gère l'occurrence des événements imprévus. Par anticipation, les signaux faibles sont traités afin d'éviter l'occurrence d'un événement imprévu. Le système est ensuite capable de réagir pour pallier à l'occurrence d'un événement imprévu. Si l'incident ou l'accident n'a pas pu être évité, alors le système engage des actions curatives notamment des alternatives de fonctionnement qu'il évalue ensuite et apprend de ses succès et de ses échecs.

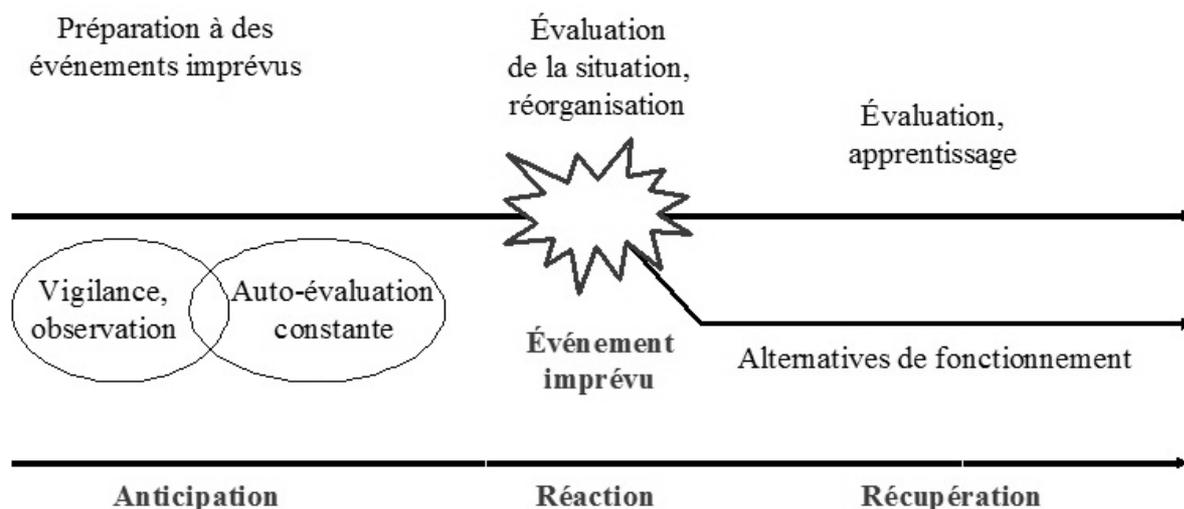


Figure 11. Organisation d'un système résilient [Hollnagel, 2006]

Par rapport aux propriétés présentées dans la Figure 11, la résilience informatique vue comme la qualité d'un système tolérant aux pannes n'est qu'un aspect partiel du concept de résilience. Seul le domaine des systèmes sociotechniques aborde la propriété d'anticipation. L'intérêt de la résilience en tant que concept émergent porte également sur la gestion des perturbations ou plus généralement des événements imprévus voire sans précédents. La gestion des perturbations est au centre de la problématique de la sûreté de fonctionnement, domaine auquel la résilience peut contribuer au travers des aspects proactifs. Hale et Heijer abordent explicitement la question de l'utilité du concept de résilience [Hale et Heijer, 2006]. Pour les auteurs, nous devons nous demander «si nous avons besoin du terme "résilience" pour définir les caractéristiques d'un système puisque celles-ci ont déjà été abondamment discutées dans la littérature sur la gestion et la culture de la sécurité». [Dekker, 2006] apporte un premier éclairage : *le besoin de l'ingénierie de la résilience naît en partie de l'inadéquation des modèles actuels à comprendre, et des méthodes pour prédire les dégradations de la sécurité dans les systèmes complexes [...]*. L'intérêt du concept de résilience provient de l'insuffisance des études et recherche exclusivement centrées sur l'erreur et les incidents [Leplat, 2007]. La résilience conduit à envisager la sécurité non plus d'une manière réactive, mais proactive.

En fonction des types de situations imprévues que nous avons définies à partir du Tableau 4, les moyens d'actions peuvent être plus ou moins adaptés ou disponibles. Lorsque la résilience intrinsèque du système technique ne suffit plus, l'apport improvisé de l'opérateur peut constituer le dernier rempart face aux menaces. L'opérateur humain est capable de s'adapter afin d'apporter sa contribution à la résilience du Système Homme-Machine.

Après avoir mis en exergue les différentes propriétés du concept de résilience, la question qui se pose est : comment passer de la sûreté de fonctionnement à la résilience des systèmes? Pour ce faire, nous aborderons dans le chapitre suivant, les méthodes, les outils ou les démarches à mettre en œuvre pour assurer les propriétés d'anticipation, de réaction ou de récupération des systèmes résilients.

## 4 Conclusion

Dans ce premier chapitre, nous avons commencé par définir la notion de risque, puis celle de sûreté de fonctionnement dans les Systèmes Homme-Machine ainsi que son intérêt pour la maîtrise des risques. Etant donné que ces risques peuvent être engendrés par la composante humaine, ce chapitre s'est intéressé aux erreurs humaines et aux méthodes d'analyse et d'évaluation des risques associés. Ces méthodes présentent néanmoins des limites puisque, si les facteurs techniques sont relativement bien maîtrisés, les facteurs humains eux ne le sont pas. Certains auteurs préconisent donc de faire appel à des concepts comme la résilience pour palier ou contribuer à la maîtrise du risque résiduel des systèmes notamment lorsque ces derniers font face à des situations critiques ou sans précédent.

Dans la deuxième partie de ce chapitre, nous présentons un état de l'art du concept polysémique et pluridisciplinaire de résilience. Quelques définitions dans divers domaines ont été présentées. Les problématiques dégagées nous ont permis de proposer une définition de la résilience d'un SHM et d'établir une typologie des situations auxquelles ce système devrait pouvoir faire face basée sur la matrice «Occurrence-Gravité». Nous avons abordé la question de la mesure de résilience. Une revue de quelques approches de mesure de la résilience dans différents domaines a été présentée. Certaines mesures de la résilience sont simples étant donné qu'elles quantifient la résilience mais en ne s'attachant qu'à un aspect partiel de sa définition. D'autres mesures proposées ne prennent pas en compte simultanément la durée et l'effet (ou amplitude) des perturbations, ainsi que la vitesse de récupération du système. Des valeurs instantanées sont proposées sans considérer leurs évolutions possibles. De plus pour un SHM, l'opérateur humain, de par son habileté à analyser et à comprendre les nouvelles situations, apporte sa contribution à la résilience du système global. Cette contribution devrait être prise en compte dans l'évaluation de la résilience du SHM. Une de nos contributions sera de proposer une quantification de la résilience des SHM.

Nous avons également positionné la résilience par rapport à des concepts déjà existants comme la stabilité, la résistance et la robustesse. Les caractéristiques (anticipation-réaction-récupération) d'un système résilient ont ensuite été présentées pour aborder la problématique du passage de la sûreté de fonctionnement à la résilience : comment anticiper l'occurrence des événements perturbateurs en phase de conception et d'exploitation, et comment réagir à l'imprévu et adapter les mécanismes de traitements ou de récupération de situations imprévues. Nous identifions ainsi le besoin d'une méthode bien adaptée pour la mesure de la résilience d'un SHM face à des situations critiques.

Dans le chapitre suivant, nous aborderons les méthodes, les outils ou les démarches à mettre en œuvre pour maintenir les propriétés d'anticipation, de réaction ou de récupération des systèmes résilients. Il s'agit des méthodes ou pratiques mises en œuvre dans les Systèmes Homme-Machine afin de gérer les événements imprévus et d'améliorer leur résilience.

---

## **Chapitre 2. Démarches et outils d'aide à la réaction et la récupération face à l'imprévu**

---

Chapitre 2. Démarches et outils d'aide à la réaction et la récupération face à l'imprévu.....	37
1 Introduction .....	38
2 Amélioration de la résilience par la gestion de l'imprévu.....	39
2.1 L'ingénierie de la résilience.....	39
2.2 Méthodologies .....	41
3 Démarches et outils pour réagir à l'imprévu .....	44
3.1 Les formations à la gestion de l'imprévu .....	44
3.2 Les méthodes de raisonnement pour réagir à l'imprévu.....	45
3.3 Outils d'entraînement à la prise de décision face à un imprévu .....	47
3.4 Synthèse des méthodes et outils pour réagir à l'imprévu .....	49
4 Système prédictif et/ou d'apprentissage d'aide à la résilience .....	51
4.1 La prédiction .....	51
4.2 L'apprentissage .....	52
4.3 Iterative learning control.....	53
4.4 Prédiction par réseau de neurones.....	55
5 Conclusion .....	59

## **1 Introduction**

Les capacités de résilience d'un SHM permettent à ce dernier de faire face à l'occurrence de situations critiques. La résilience est similaire à un processus dynamique d'adaptation du système face une situation opérationnelle. Le système résilient doit donc disposer d'outils et de méthodes pour l'amélioration continue de ses caractéristiques de résilience. Dans ce chapitre, nous présentons d'une part, les démarches et les outils d'aide à l'anticipation, à la réaction et la récupération face à l'imprévu, et d'autre part, la faisabilité du développement d'outils de prédiction ou d'apprentissage pour l'aide à l'amélioration de la résilience d'un SHM.

Dans la première partie du chapitre, nous présentons la problématique de la réaction à l'imprévu et la récupération de système résilient face à une perturbation. Les méthodes de défenses ou mécanismes de parades des systèmes hérités de la sûreté de fonctionnement sont présentées et le besoin de méthodes et d'outils pour réagir à l'imprévu tant pour la composante humaine que pour la composante technique du SHM est dégagé.

Dans la deuxième partie du chapitre, nous détaillons quelques démarches et outils déjà utilisés dans les domaines communément associés à la gestion de l'imprévu. Il s'agit des formations d'opérateurs à la gestion de l'imprévu, des méthodes de raisonnement pour réagir à l'imprévu et des entraînements à la prise de décision face aux imprévus. Ces démarches et outils concernent essentiellement la composante humaine du SHM.

Enfin, nous présentons quelques outils pouvant être mis en œuvre au sein du système technique afin de constituer une aide aux opérateurs humains du système ; ce qui nous permettra de dégager le cadre des travaux à réaliser dans le troisième chapitre.

## 2 Amélioration de la résilience par la gestion de l'imprévu

La résilience est abordée dans de nombreux domaines, mais il n'existe pas de formalisation de référence à la différence des paramètres de la sûreté de fonctionnement. Néanmoins, la résilience est généralement relative à la capacité d'un système (un organisme, un humain, etc.) à faire face et de façon positive, à une perturbation. A partir de l'organisation du système résilient proposé par Hollnagel (Figure 11), une interprétation temporelle du concept de résilience est illustrée sur la Figure 12.

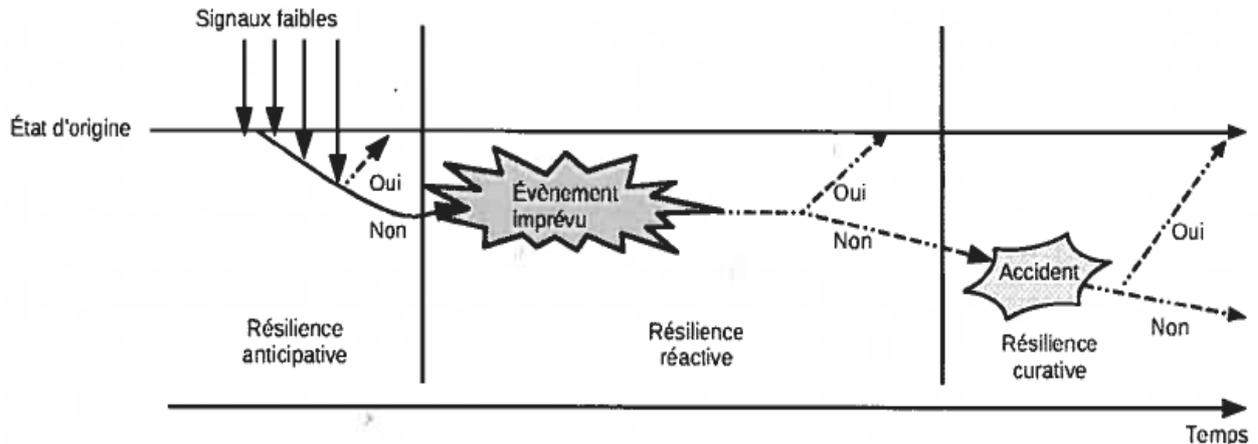


Figure 12. Interprétation temporelle du concept de résilience [Richard, 2012]

La résilience permet de gérer l'occurrence des perturbations imprévues de façon :

- Anticipative : par le traitement des prémices d'un événement redouté notamment par l'identification des signaux dits faibles annonceurs d'incident ou d'accident.
- Réactive : tous les événements notamment les événements sans précédents ne peuvent être anticipés ; l'événement imprévu a eu lieu et le système ou l'opérateur humain réagit afin de limiter les conséquences possibles.
- Curative : l'incident ou l'accident n'est pas évité ou la réaction face à l'imprévu n'est pas adéquate mais le système ou l'opérateur humain réussit à limiter les conséquences éventuelles.

Dans le cadre de notre étude des Systèmes Homme-Machine, les perturbations peuvent être engendrées par l'homme, le système technique ou l'environnement de travail. De plus nous nous intéressons à des situations critiques donc causées par des événements imprévus sans précédent ; ce qui permet de positionner notre étude temporellement dans le cadre de résilience réactive et curative illustrées sur la Figure 12.

Dans la section suivante, nous abordons la mise en œuvre de la résilience dans les systèmes. La problématique de l'ingénierie de la résilience est présentée afin de dégager les types de démarches, d'outils ou d'approches de gestion de l'imprévu.

### 2.1 L'ingénierie de la résilience

L'ingénierie de la résilience est une alternative à la sécurité des systèmes visant à compléter les méthodes déjà existantes de management des facteurs humains et organisationnels. La sécurité ne se résume plus à l'absence d'accidents mais serait plutôt la faculté d'un système à maîtriser les situations critiques, notamment au travers des capacités d'adaptation des acteurs du système [Hollnagel, 2007; Stenn et Aven, 2011].

L'objectif global est d'améliorer la disponibilité des ressources et l'anticipation des menaces à tous les niveaux [Stenn et Aven, 2011; Hollnagel, 2007]; il faut ainsi :

- i. Des méthodes d'analyse, de mesure et de contrôle ou supervision de la résilience des systèmes dans leur environnement de fonctionnement. Le but est d'évaluer, de superviser et de contrôler les risques pour répondre d'une part, aux menaces régulières et irrégulières et d'autre part aux menaces sans précédent.
- ii. Des outils et des méthodes d'amélioration de la résilience des systèmes en fonction de leur environnement. De plus des mécanismes de parade peuvent être mis en œuvre, par exemple pour parer au non fonctionnement concourant au renforcement de la résilience du système.
- iii. Des techniques de modélisation et/ou de prédiction des effets à court et à long terme des perturbations et des actions sur l'état des systèmes. La prédiction devient très importante dès lors qu'elle permet d'anticiper l'évolution des perturbations afin de permettre au système de prendre des décisions préventives.
- iv. Apprendre par l'expérience de la gestion des menaces imprévues. L'apprentissage permet au système de renforcer ses connaissances pour mieux anticiper et faire face aux futures perturbations.

La première étape de l'ingénierie de la résilience est relative au besoin de maintenir le système "sous contrôle" : il est alors nécessaire de savoir "ce qui s'est passé" (le passé), "ce qui se passe" (le présent) et "ce qui pourrait arriver" (l'avenir) [Hollnagel et Woods, 2006]. Cela permettrait de savoir quoi faire afin d'activer les ressources requises pour le faire. Le Système Homme-Machine résilient doit donc avoir certaines caractéristiques que les auteurs décrivent comme des composantes de la résilience. La Figure 13 présente les trois composantes caractéristiques de la résilience : la connaissance, la compétence et les ressources.

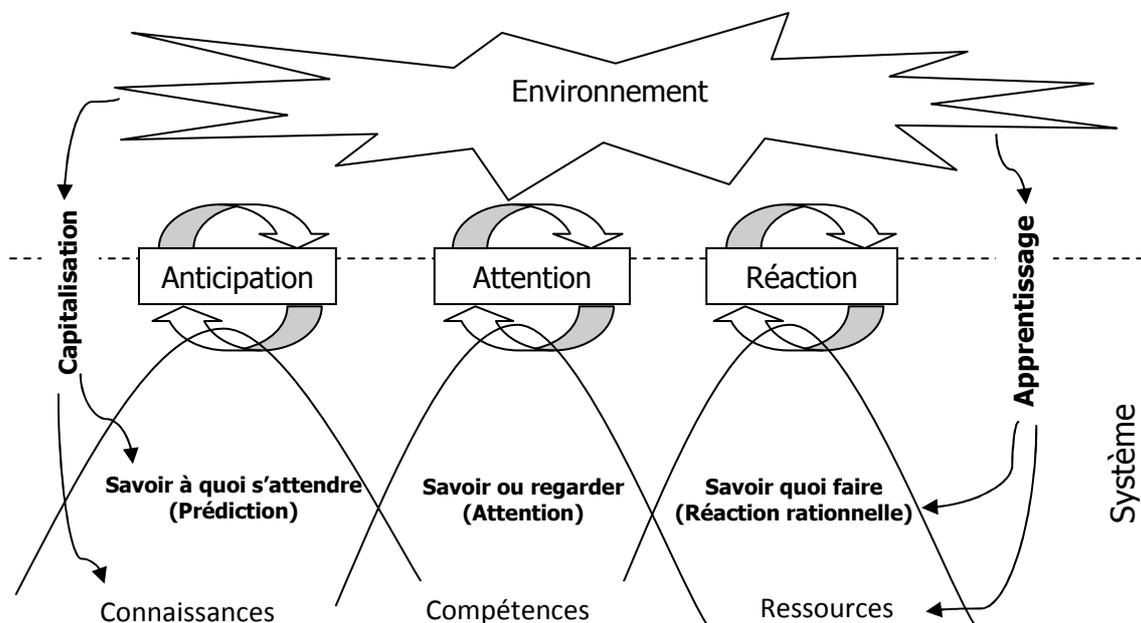


Figure 13. Les composantes de la Résilience d'un Système (adapté de [Hollnagel et Woods 2006])

La connaissance est nécessaire pour savoir à quoi s'attendre (*anticipation*) et par suite où porter son *attention*. Les compétences et les ressources sont importantes pour la capacité de *réaction* du système pour répondre avec succès aux menaces. La ligne en pointillés au centre de la Figure 13 représente la limite entre le SHM et son environnement.

La deuxième étape est relative à l'amélioration continue de la résilience du système. Cette étape est induite par les deux dernières étapes notamment le besoin en prédiction et d'apprentissage au sein des systèmes résilients. En effet, les trois composantes de la résilience doivent être exercées en permanence : le système doit constamment actualiser ses connaissances, compétences et ressources par effet d'apprentissage de ses actions (réussites et échecs). La prédiction permet d'anticiper les menaces sur le système. Ce dernier sait alors où porter son attention et quelles réponses apporter grâce aux compétences et ressources disponibles. Par suite, le système apprend de ses actions de management des perturbations en capitalisant des connaissances. Ce renforcement de connaissance permettra également de mieux prédire les perturbations à venir.

Avant d'aborder en détails les approches, les démarches ou les outils pour la gestion de l'imprévu, nous présentons une synthèse des méthodologies, inspirées des méthodes classiques de la sûreté de fonctionnement, pouvant être adoptées pour améliorer la résilience des systèmes.

## **2.2 Méthodologies**

Afin d'améliorer la sûreté de fonctionnement du Système Homme-Machine, différents moyens peuvent être mis en œuvre. Ils visent le traitement des fautes et la limitation de la propagation des défaillances. Ces moyens sont, en autres, la redondance, la coopération et la mise en place de barrières [Vanderhaegen *et* Millot 2001]. Ces moyens peuvent être développés en tant que mécanismes de parade au sein des systèmes résilients pour limiter les défaillances. Parmi les mécanismes de parades, on peut retenir :

### **- Parades basées sur le principe de redondance**

Pour améliorer la résilience d'un système, on pourrait mettre les éléments critiques en redondance [Luo *et* Yang, 2002]. Les éléments affectés ne sont plus sollicités et les éléments redondants les remplacent [Marshall, 2002]. On distingue deux types de redondance. La redondance fonctionnelle est relative aux alternatives d'assurer "une fonction" du système qui ne repose pas sur les mêmes composantes physiques. La redondance physique consiste en une protection matérielle contre les pannes lorsque la redondance fonctionnelle n'est pas possible. Cela permet d'utiliser les éléments non affectés pour compenser et réaliser les fonctions des éléments affectés [Chen *et al.*, 2007 ; Nakayama *et al.*, 2007 ; Numanoglu *et al.*, 2006], ce qui fonctionne compense ce qui ne fonctionne pas.

Lorsque la stratégie de redondance est trop coûteuse, il faut optimiser la gestion des perturbations [Neema *et al.*, 2004; Tianfield *et* Unland, 2004] en développant des systèmes résilients aux fautes capables d'évaluer et corriger les dérives par des actions préventives. Il est ainsi possible de maintenir le système entre deux bornes minimale et maximale d'acceptabilité ou de gestion des perturbations plutôt qu'en un point ou une valeur stable [Martin, 2005]. Le management des ressources et de l'autonomie des Systèmes Homme-Machine concourt également à l'amélioration des capacités de résilience du système [Zieba *et al.*, 2010] notamment au travers de la coopération Homme-machine.

### **- Parades basées sur la coopération Homme-machine**

L'interaction entre l'opérateur humain et le système technique peut faciliter la résolution des problèmes dans les situations anormales [Vanderhaegen, 1997, 1999b; Hsieh, 2009; Zieba *et al.*, 2009]. Il faudrait alors faciliter la prise en main du SHM par les opérateurs en rendant les possibilités d'intervention humaine aisée. Il faut néanmoins garantir la confiance des opérateurs humains dans les systèmes automatisés pour éviter qu'ils ne reprennent trop la main ; l'objectif étant d'éviter d'éventuelles erreurs humaines.

Dans le cadre de cette coopération Homme-machine, une tâche n'est plus attribuée à une seule entité, mais peut être partagée entre les opérateurs humains et la machine. La coopération qui découle de l'interaction entre les opérateurs et le système technique a pour but l'amélioration de performances du SHM, la prévention des erreurs humaines ou leur récupération par l'optimisation des échanges d'informations, l'aide à la décision et le partage des tâches [Quéva, 2008].

#### - **Parades basées sur la mise en place de barrières**

Une barrière peut soit prévenir l'exécution d'une action ou l'apparition d'un événement redouté, soit prévenir ou diminuer l'impact des conséquences. L'analyse de risque peut aboutir à la conception de barrières qui peuvent être mises en place par le concepteur, l'exploitant ou les utilisateurs du Système Homme-Machine depuis sa conception jusqu'à son utilisation [Vanderhaegen, 03].

Le concepteur, suite à une analyse des risques mais également en respectant des normes et des règles de sécurité, équipe son système de barrières afin d'établir des défenses ou mécanismes de parade. L'exploitant met également en place de nouvelles barrières notamment lors l'installation du système (*e.g.*, les issues de secours, les détecteurs d'incendie, des moyens de protection, etc.). Les conditions de travail et le retour d'expérience (REX) amènent l'équipe d'opérateurs humains à créer des barrières afin de se prémunir contre des incidents ou des accidents.

#### - **Parades basées sur l'apprentissage**

On pourrait également mettre en œuvre des mécanismes de parades dépendant des capacités d'apprentissage du système résilient en apprenant ou en réapprenant aux éléments du système affectés à fonctionner correctement ou à mieux fonctionner [Cheveau et Wybo, 2007]. Ce qui ne fonctionne plus est réinitialisé et préparé pour un fonctionnement futur. L'opérateur humain par sa grande capacité d'adaptation et d'apprentissage, doit pouvoir prendre la main ou remplacer l'automatisme selon le contexte dans les scénarios critiques. L'opérateur développerait alors des comportements assurant sa survie et la sécurité du système [Marcantoni, 2009]. Il faudrait en outre constituer une base de données en termes de retour d'expérience en capitalisant les bonnes pratiques afin d'apprendre des succès et des échecs [Vanderhaegen, 2010a].

#### - **Synthèse des mécanismes de parades**

Les mécanismes de parade ainsi que les composantes de la résilience d'un système (présenté précédemment), soulignent la nécessité pour un SHM d'améliorer en permanence :

- ses capacités d'anticipation par prédiction des effets des perturbations
- et ses capacités d'apprentissage afin de renforcer ses connaissances et d'améliorer par la suite la précision de la prédiction.

Dans les systèmes sociotechniques complexes comme les SHM, la résilience résulte également de l'interaction entre les composants techniques du système et la structure sociale et organisationnelle des opérateurs humains qui pilotent le système. Le fonctionnement sûr et efficace d'un système socio-technique complexe est le résultat d'un apprentissage continu du travail et de l'interaction entre le ou les opérateurs humains et la partie technique du système dans le même environnement [Pia et Reiman, 2006]. Malgré la vulnérabilité de l'activité humaine bien souvent sources d'erreurs, c'est également un facteur de fiabilité dans la gestion des systèmes complexes fonctionnant dans un environnement critique [Vanderhaegen, 2003]. L'adaptabilité de la composante humaine est nécessaire pour par exemple faire face aux menaces ou aux phénomènes techniques imprévus. Pia et Reiman soutiennent que "la capacité des opérateurs à percevoir les dynamiques des systèmes dans lesquels ils travaillent ainsi que l'expérience engrangée, est toujours en

grande partie négligée dans la gestion des systèmes critiques". Pour avoir des systèmes plus sûrs, il convient de fournir au SHM des informations sur les menaces ou perturbations éventuelles (principe de prédiction) et de développer des mesures ou des actions adéquates pour faire face aux imprévus. L'apprentissage peut donc être cette source de gestion innovatrice des menaces en combinant les différents types de connaissance (à base d'expérience, spécifique, ou proactive) que le SHM pourrait développer [Beauchamp, 2006].

L'occurrence d'une situation critique pourrait engendrer des conséquences critiques voire catastrophiques sur le fonctionnement des Systèmes Homme-Machine et les mécanismes de parade s'avérer insuffisants puisqu'ils ne sont pas prévus pour faire face aux événements sans précédents. Dans la section suivante, nous dressons un état de l'art sur les approches, les méthodes et les outils déjà utilisés dans les domaines confrontés à la gestion de l'imprévu et pouvant être exploités comme aide à la réaction et à la récupération de situations critiques par un système résilient. Nous distinguons les types suivants de méthodologies permettant une amélioration de la gestion de l'imprévu :

- *L'amélioration des capacités intrinsèques des individus* : en présentant quelques types de formation, des méthodes de raisonnement et d'entraînement à la prise de décision déjà utilisées dans d'autres domaines,
- *L'amélioration organisationnelle* : en présentant des exemples d'actions mises en œuvre pour améliorer au niveau organisationnel les réactions d'un collectif à l'imprévu,
- *L'utilisation d'outils d'aide à la prise de décision* : en présentant quelques exemples de systèmes prédictifs et d'apprentissage pouvant servir de supports pour l'aide à la décision.

Nous développons ces différentes méthodologies dans les sections suivantes. Les deux premières sont relatives à l'amélioration des capacités de résilience des opérateurs humains du SHM. Il s'agit essentiellement de la formation de ces derniers à la gestion de l'imprévu et des méthodes de raisonnement pour leur permettre de réagir face à l'imprévu. Nous présentons également quelques outils d'entraînement des opérateurs à la prise de décisions face à l'imprévu.

Dans certains domaines (militaire, sécurité civile, etc.), les opérateurs humains sont sensibilisés à la gestion des imprévus. Néanmoins, l'utilisation d'outils d'aide à la prise de décision s'avère primordiale notamment face à l'occurrence d'évènement sans précédent. Nous présenterons également le principe de développement de systèmes prédictifs et d'apprentissage qui poseront les bases des travaux de cette thèse.

### **3 Démarches et outils pour réagir à l'imprévu**

Lors de l'occurrence d'une situation critique porteuse de risque, le SHM (les opérateurs humains et le système technique) résilient doit appréhender et évaluer la nouvelle situation afin de permettre une prise de décision ou une action rapide et adéquate. Les domaines communément associés à la gestion de l'imprévu sont : la défense, les interventions d'urgence (pompiers, urgentistes, police, etc.), les industries à risques (énergie, pétrochimie, aéronautique, etc.), la santé, l'économie. Nous présentons quelques méthodes et outils déjà utilisés dans ces domaines pour la gestion de l'imprévu notamment les formations à la gestion de l'imprévu, les méthodes de raisonnement pour réagir à l'imprévu, les outils d'entraînement à la prise de décision [Quillaud *et al.*, 2010].

#### **3.1 Les formations à la gestion de l'imprévu**

Des accidents et des catastrophes continuent de survenir au sein de systèmes pourtant réputés à la pointe de la technologie et de la sécurité comme l'accident nucléaire de Fukushima au Japon à la suite d'un tremblement de terre suivi d'un tsunami. Les connaissances techniques et même l'expérience ne seraient alors pas les seuls facteurs à prendre en compte dans la gestion de l'imprévu. D'autres compétences, en particulier humaines, tout aussi importantes mais longtemps délaissées, sont à mettre en cause ; il s'agit des capacités non-techniques, cognitives et relationnelles des individus. Une des solutions est de proposer une préparation formelle ou une formation pour faire face aux situations critiques au même titre que les formations techniques [Quillaud *et al.*, 2010].

##### **- La formation au leadership**

Le leadership est relatif à la capacité du chef ou du dirigeant à influencer, à motiver et à fédérer les membres de son équipe autour des décisions qu'il prend. Dans les formations au leadership, on considère que les situations imprévues ne peuvent être surmontées que par la capacité individuelle des dirigeants à prendre les bonnes décisions.

Ces formations s'adressent spécifiquement aux décideurs pour les former à l'encadrement et à la gestion de l'imprévu. Le principe est de proposer une série de cours théoriques afin de préparer les personnes à leurs fonctions de décideurs autour de thèmes comme : les devoirs d'un décideur, le respect de son équipe, l'intégrité du leader, les qualités d'un bon leader face à une situation critique, les facteurs pouvant entraîner une mauvaise prise de décision, etc. Mais ces formations restent théoriques et sont surtout préventives en listant des risques sans donner de méthode ou d'outil permettant de les éviter. Néanmoins, cette formation au leadership montre que le style de leadership et les capacités non-techniques du leader jouent un rôle important dans les capacités de décision.

##### **- Les formations à la créativité**

La réaction à l'imprévu nécessite pour les individus d'être créatifs pour imaginer des solutions lorsque finalement la situation critique survient. L'une des perspectives de la gestion de l'imprévu vise à tenter d'améliorer à la fois les capacités d'anticipation et d'adaptation des individus en développant leur créativité par la formation. Faire face à l'imprévu revient souvent à trouver une solution à un problème qui *a priori* n'avait pas été envisagé. Pour ce faire l'individu doit s'appuyer sur ses connaissances mais aussi sur ses capacités d'improvisation, d'innovation et son imaginaire afin de créer des solutions nouvelles, inédites. La créativité est fortement imbriquée avec les concepts de reconstruction de sens (Sensemaking) et de Résilience [Comfort, 1999 ; Weick, 1993].

De nombreuses méthodes et outils spécifiques ont été développés pour tenter de favoriser la créativité chez les individus ou les groupes comme la reformulation de problème, les techniques d'association d'idées, le brainstorming (ou remue-méninges) et le brainwriting,

les méthodes aléatoires ou basées sur le hasard, etc. Ces méthodes de formation sont surtout utilisées pour développer la recherche et l'innovation, la réflexion stratégique ou pour répondre à un problème ponctuel. De ce fait, ces méthodes sont plus généralement orientées vers l'anticipation que sur la gestion de l'occurrence d'un imprévu et la réactivité.

#### - **Les formations type CRM**

Dans le domaine de l'aéronautique, la procédure de formation appelée « Crew Ressource Management » ou le « Cockpit Ressource Management » (CRM) a été développée suite au constat suivant : la cause principale de la plupart des accidents dans l'aviation est l'erreur humaine. Le CRM est une méthode pédagogique visant à améliorer la sécurité aérienne en se concentrant sur les facteurs humains tels que la communication entre membres d'équipage, le leadership et la prise de décision dans le cockpit face à une situation critique. Le CRM peut être défini comme un système de gestion qui permet une utilisation optimale de toutes les ressources disponibles pour promouvoir la sécurité et améliorer l'efficacité d'une organisation. La formation CRM s'appuie sur l'enseignement de méta connaissances et un changement des pratiques collectives (résolution de problèmes, prise de décision, travail d'équipe, gestion de stress, etc.), et vise à améliorer les capacités collectives de réaction en situation critique dans une approche d'analyse des risques liés aux facteurs humains [Helmreich *et al.*, 1999].

Le CRM revêt actuellement dans le milieu aéronautique civil un caractère de formation obligatoire durant toute la durée de la carrière des pilotes. La méthode a depuis été adoptée dans d'autres domaines comme le ferroviaire, les services d'incendie, les industries notamment maritimes, etc. Les résultats de ce type de formation sont difficilement quantifiables en termes de réaction à l'imprévu ou de nombre d'erreurs commises, elle permet néanmoins de constater des modifications des comportements et des types de réactions de la majorité des participants. Cependant la méthode n'apporte pas de réponse spécifique en termes de méthode de raisonnement pour améliorer la réactivité face à l'imprévu ou pour reconstruire du sens. Elle pourrait donc être complétée par quelques concepts ou outils d'aide à la décision comme la boucle OODA présentée dans la section suivante.

### **3.2 Les méthodes de raisonnement pour réagir à l'imprévu**

Les méthodes de formation à la gestion de l'imprévu mettent en évidence le besoin d'améliorer les capacités cognitives et relationnelles des individus mais n'apportent pas de réponse en termes d'actions à mener. Les méthodes de raisonnement pour faire face aux situations critiques visent à élaborer ces solutions d'aide à la prise de décision.

#### - **La boucle OODA**

La boucle OODA (pour Observer, s'Orienter, Décider, Agir) est un concept développé par un instructeur militaire, le colonel John Boyd de l'United States Air Force, pour conceptualiser sa capacité à battre tous ses élèves et ainsi mieux les former. A l'origine, le concept est utilisé pour formaliser le cycle de prise des décisions sous contrainte temporelle dans les opérations militaires. L'idée de base est de prendre l'ascendant sur un ennemi en passant le plus rapidement possible par quatre processus cycliques (O-O-D-A) permettant de prendre plus rapidement ses décisions quelle que soit la situation, même en cas d'imprévus.

Ces quatre étapes, l'Observation, l'Oriente, la Décision et l'Action (OODA) permettent de savoir quand une décision doit être prise pour éviter de rester inactif :

- Observation : Regroupe l'observation du développement de l'action en cours et des informations extérieures ainsi que la manière dont celles-ci influencent l'action sur le terrain.

- Orientation : Processus de filtrage des nombreuses observations qui interagissent. Il est basé sur les connaissances et surtout l'expérience du décideur. L'orientation dépend beaucoup de l'héritage culturel et du vécu du décideur. Si plusieurs personnes doivent décider, elles n'auront pas les mêmes bases, ce qui peut rapidement bloquer la prise de décision. C'est le piège OO-OO-OO : les décideurs traitent les informations sans pouvoir définir lesquelles sont les plus pertinentes et restent bloqués dans une boucle Observation-Orientation.
- Décision : la décision est considérée comme une hypothèse. Ce n'est pas une analyse précise de l'ensemble des informations ni un calcul déterministe de l'évolution de l'action. On pose l'hypothèse qu'une action est meilleure que les autres possibilités, qu'elle va donner de bons résultats ou qu'elle est réalisable. Par suite, cette hypothèse doit être testée.
- Action : il s'agit de tester l'hypothèse faite précédemment. Une fois mise en œuvre, les résultats de cette action vont alors être observés ce qui va ramener celui qui décide à la première étape. On peut donc reprendre le cycle.

Des variantes ont aussi été développées dans l'aéronautique pour compléter les formations de type CRM dans le but de proposer une méthode de raisonnement applicable lorsque les procédures opérationnelles standard ne permettent plus de répondre aux situations critiques.

La boucle OODA permet l'amélioration et l'accélération du processus de prise de décision afin de réagir vite. Le premier avantage est d'éviter de rester inactif et sortir du piège OO-OO-OO. En effet tant qu'une hypothèse d'action n'est pas formulée, l'immobilisme est garanti. Le concept permet également aux décideurs de pouvoir réévaluer rapidement leurs décisions en les testant, d'agir pour redonner du sens à la situation et de prendre une décision. Néanmoins, en cas de situation critique, le concept propose uniquement d'agir et d'observer (test des hypothèses) pour se reconstruire une meilleure représentation de la situation [Boyd, 1976].

#### - **Méthodes d'aide à la construction de sens**

Le processus de construction de sens appelé "sensemaking" est relatif à "*l'effort délibéré effectué pour comprendre les événements qui est habituellement déclenché par des changements inattendus [...] qui nous conduisent à douter de notre compréhension précédente*" [Klein *et al.*, 2007]. Ainsi la capacité mentale d'un groupe à réagir à l'imprévu dépend en grande partie de la faculté qu'a ce groupe à pouvoir redonner du sens à la situation incompréhensible dans laquelle il se trouve.

Pour rationaliser et améliorer ce processus de reconstruction du sens, des méthodes factuelles ont été proposées comme la méthode de la boule de cristal ou "Crystal Ball". Cette méthode est utilisée pour aider à l'analyse de la représentation collective d'une situation. Le but est de forcer des opérateurs humains à penser différemment et les inciter à trouver toutes les failles possibles à leur raisonnement (production d'autocritiques constructives) pour finalement produire une solution plus juste.

Les méthodes d'aide à la reconstruction de sens se basent sur des principes d'analyses systématiques des données disponibles afin d'aider à une compréhension suffisante pour pouvoir agir de la manière la plus adaptée possible face à une situation critique. Cependant ces méthodes n'ont été jusqu'ici que peu expérimentées.

### **3.3 Outils d'entraînement à la prise de décision face à un imprévu**

Les formations à la gestion de l'imprévu posent les bases théoriques pour l'amélioration des capacités cognitives et relationnelles des individus. Les méthodes de raisonnement pour réagir à l'imprévu visent à améliorer et accélérer les processus de prise de décision face aux situations critiques. Tous ces concepts et ces méthodes doivent être mis en pratique pour vérifier leur applicabilité notamment en situation critique.

#### **- La simulation**

Les opérateurs humains se basent sur leurs connaissances, leurs expériences et les informations dont ils disposent pour les prises de décisions en situation opérationnelle. Une approche de l'entraînement à la prise de décision face à l'imprévu considère donc que ces capacités peuvent être améliorées par l'entraînement des décideurs à une plus grande variété de situations, en particulier celles relatives à des événements rares. Dans les domaines à risques, les situations redoutées voire critiques sont pour la plupart difficilement reproductibles sur le terrain. Le but de ces simulations est de permettre de développer chez les participants un plus large panel de stratégies décisionnelles, d'expériences et d'améliorer leur réactivité par l'entraînement [Quillaud *et al.*, 2010].

Le simulateur est l'outil de mise en œuvre de la simulation. C'est un dispositif technique permettant de modéliser plus ou moins fidèlement un système réel ou de reproduire le comportement d'un phénomène réel, de l'environnement de travail, etc. Le précurseur de l'entraînement à la réaction aux situations critiques ou d'urgences en environnement simulé est le domaine aéronautique mais de nombreux domaines utilisent la simulation :

- pour l'entraînement des équipages en simulateur de vol, dans le cadre de la formation CRM ou lors d'une qualification sur un nouvel appareil. Le simulateur est également utilisé pour mener les enquêtes après l'occurrence d'accidents.
- pour la formation des conducteurs sur des simulateurs de conduite ferroviaire, automobile, maritime, etc.

L'entraînement à la prise de décision face à l'imprévu par la simulation permet de reproduire les conditions de l'occurrence d'un imprévu. Elle offre la possibilité de contrôler beaucoup de variables en temps réel et permet ainsi de confronter les utilisateurs à de très nombreux scénarios. Elle reste néanmoins limitée puisqu'on ne peut imaginer tous les cas de figure. De plus, ces simulations sont très coûteuses à mettre en place et nécessitent un outillage important.

#### **- jeux sérieux ou « Serious games »**

Les jeux sérieux sont des applications souvent logicielles à buts pédagogiques. Ils concernent un vaste domaine d'application : communication, enseignement, formation, entraînement, marketing, information, idéologie, religion, humanitaire, politique, écologie, santé, sécurité, etc. A travers le jeu, le joueur perçoit des messages directs tels que ses gains ou les résultats de ses stratégies ainsi que des messages de sensibilisation indirects ou subliminaux tels des messages liés à l'écologie et la dégradation du climat terrestre, l'humanitaire et la faim dans le monde, l'économie et le développement durable, la sécurité et la santé des personnes, etc. Un jeu sérieux comporte donc une double intention : une intention ludique et une intention sérieuse.

C'est généralement un jeu vidéo intégrant un scénario utilitaire avec une ou plusieurs dimensions. Celles-ci sont catégorisées suivant l'objectif à atteindre [Alvarez, 2009].

- diffuser un message,
- dispenser un entraînement,
- permettre la collecte de données.

On peut regrouper les jeux sérieux en cinq catégories [Alvarez *et al.*, 2009] :

- Advergaming : jeux destinés à la publicité.
- Edutainment : jeux à vocation éducative.
- EduMarket Game : sensibilisation à des enjeux sociaux et économiques.
- Jeux engagés : sensibilisation sur des sujets politiques, géopolitiques.
- Jeux d'entraînement et de simulation. On trouve dans cette catégorie les « serious play » ou les simulations sérieuses.

Différentes situations telles des situations imprévues ou des situations liées à des menaces régulières, irrégulières ou sans précédent peuvent être reproduites au travers d'un jeu sérieux. Les mécanismes de gestion de ces situations peuvent alors y être étudiés individuellement ou collectivement. De nombreux jeux sérieux ont déjà été développés, entre autres :

Le jeu sérieux « MicroSim » illustré sur la Figure 14 est une application autodirigée et permet de mettre des étudiants de médecine en situation d'urgence et de s'entraîner aux règles à suivre pour établir un diagnostic médical.



**Figure 14. « MicroSim » ou jeu sérieux pour mise en situation professionnelle [Catanese, 2009]**

La plate-forme « Cor&Gest », illustrée sur la Figure 15, a été développée pour simuler les activités de conduite et de supervision ferroviaires [Vanderhaegen, 2009]. Elle permet de sensibiliser les sujets à différentes situations telles que les situations normales de conduite ou de supervision, mais également les situations liées à des perturbations techniques et/ou humaines régulières, irrégulières ou sans précédent. C'est en ce sens que cette application peut être assimilée à un jeu sérieux.

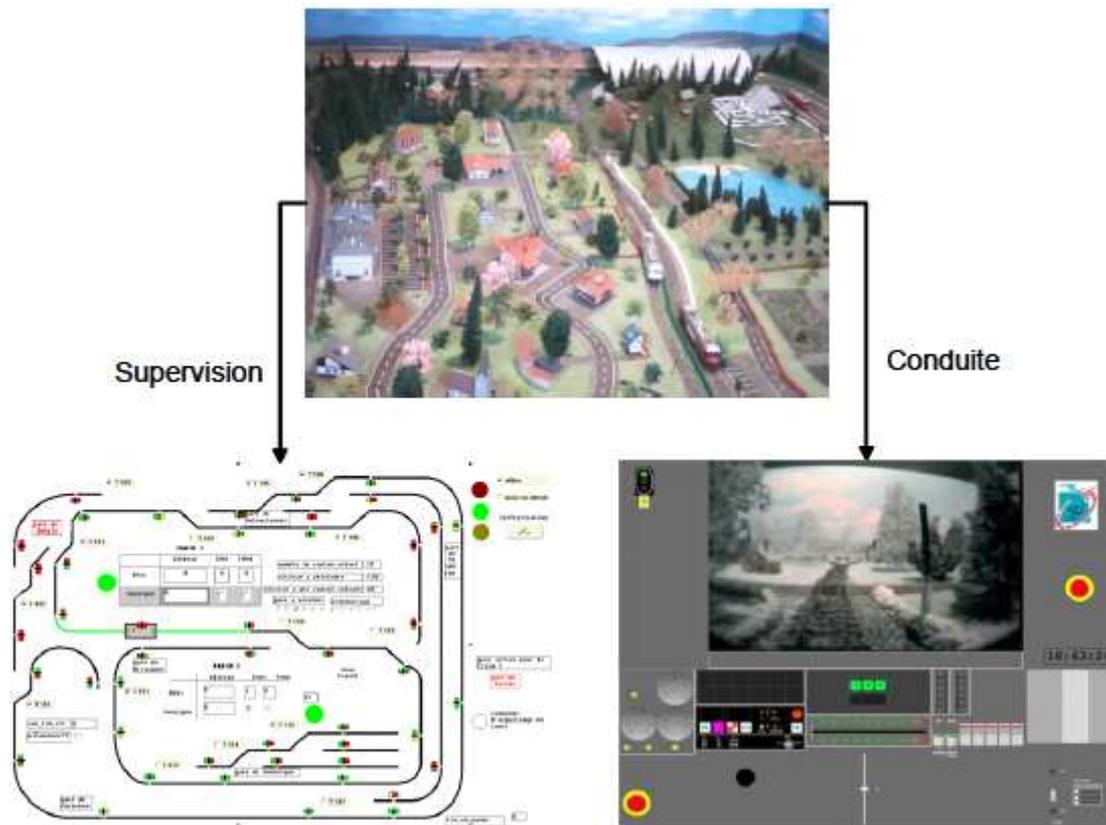


Figure 15. «Cor&Gest» ou jeu sérieux pour mise en situation de contrôle et de supervision [Vanderhaegen, 2009]

Tout comme la simulation, les "serious games" permettent de reproduire plus ou moins fidèlement les conditions réelles de la survenue d'un imprévu même si les scénarios restent limités. Le potentiel des "serious games" pour l'apprentissage, la formation ou l'éducation est avéré. Les interfaces des jeux-vidéos, leur structure narrative, les modalités d'apprentissage (essai-erreur) apparaissent comme des caractéristiques intéressantes. Des institutions comme l'armée américaine, des universités de médecine, mais aussi des grandes sociétés, ont développé des "serious games" afin de former leurs personnels à des problématiques spécifiques.

### 3.4 Synthèse des méthodes et outils pour réagir à l'imprévu

Les démarches/méthodes ou outils présentés, même s'ils restent limités, permettent la formation, le raisonnement et l'entraînement des opérateurs dans le but d'améliorer leurs capacités de réaction face à l'imprévu. Le système technique doit également contribuer à la résilience de SHM au travers d'outils ou de méthodes d'analyse, d'évaluation ou de contrôle de la résilience de l'ensemble Homme-machine. En effet, face à des événements imprévus, le SHM doit gérer ses connaissances de façon dynamique afin de surmonter les problèmes. Les opérateurs devraient appliquer certains comportements à partir d'un modèle qui implique la capacité à identifier l'état du processus en cours afin d'avancer des hypothèses sur son évolution dans le but de récupérer des perturbations.

[Vanderhaegen, 2010b] présente le principe du comportement humain basé sur les fonctions de diagnostic, de pronostic et/ou d'essai-erreur. Ce comportement est illustré sur la Figure 16. La fonction de pronostic conduit à l'identification des évolutions possibles de l'état du système, en appliquant ou pas des actions. La fonction de diagnostic se rapporte à la détermination de l'état courant du système basé sur les états précédents. Lorsque cette identification n'est pas possible en raison de l'occurrence d'états de système inconnus, on a recours au processus d'essai-erreur (en anglais, "Trial-and-error process").

Dans la première approche, l'état courant du système peut être identifié par l'expérience *i.e.* que le système fait face à une situation connue. Ainsi, un pronostic sur les états futurs du système peut être déterminé par exemple par un contrôle prédictif. Le contrôle prédictif consiste à évaluer ou à prédire les états futurs basés sur l'état actuel et les différents paramètres du Système Homme-Machine. Si l'état actuel ne peut être identifié (occurrence d'un événement imprévu, pronostic impossible), un diagnostic pourrait être fait sur la base des états précédents du système afin d'évaluer l'état actuel. Pour résumer, si l'état actuel du SHM peut être identifié ou évalué par un diagnostic, un pronostic concernant les états futurs accessibles est fait en vue de sélectionner les alternatives appropriées ou les réactions de récupération de perturbations.

La seconde approche est relative à l'apparition d'une situation critique (événement sans précédent). Dans ce cas, l'identification, le pronostic et le diagnostic ne sont pas possibles. Plusieurs comportements peuvent alors être appliqués:

- Le processus d'essai-erreur (en anglais *trial-and-error process*), *i.e.*, appliquer des actions sans connaître les conséquences éventuelles sur le SHM et les moyens de récupération des perturbations. Les actions peuvent être exécutées itérativement pour les systèmes à fonctionnement répétitif, par expérience ou par le biais d'un modèle de contrôle.
- Le processus d'attente (en anglais *wait and see process*), *i.e.*, attendre les conséquences d'une action donnée, afin de déterminer l'état actuel du système.

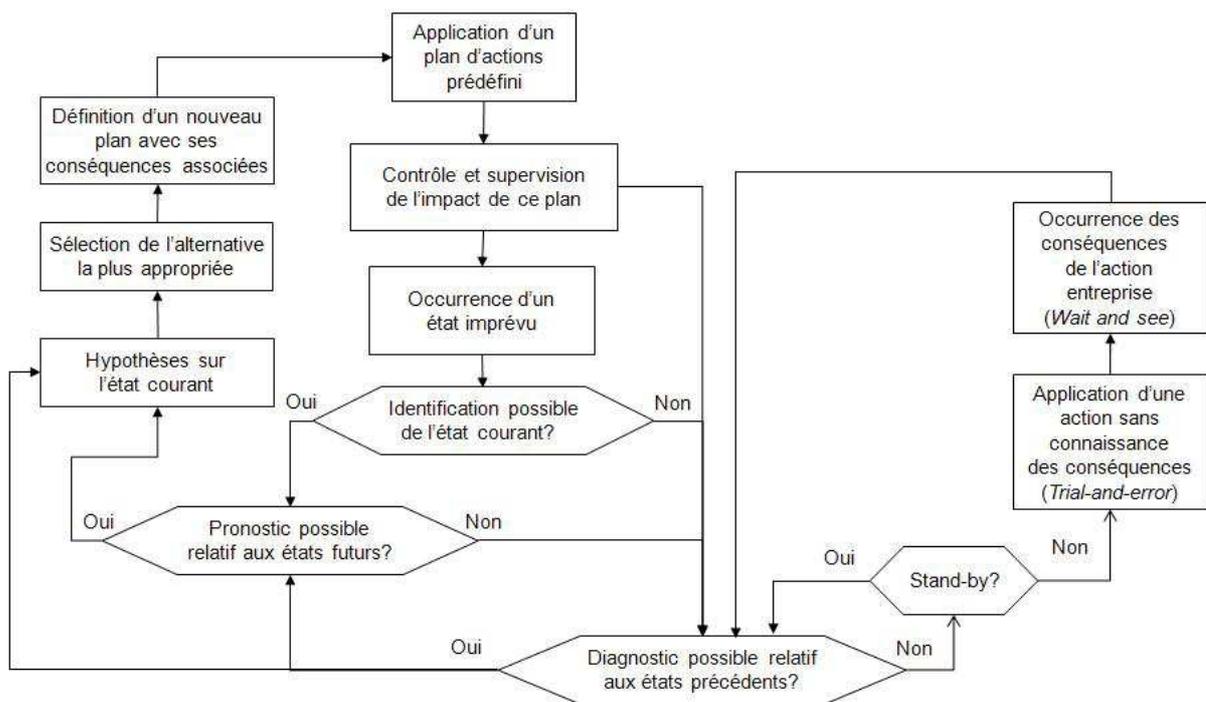


Figure 16. Comportement face à l'imprévu (adaptée de [Vanderhaegen, 2010b])

La gestion des menaces connues ou inconnues requiert des exigences différentes en termes de résilience [Westrum, 2006; Hale et Heijer, 2006]. Les opérateurs humains sont capables d'acquérir de l'expérience, d'apprendre par la répétition de leurs tâches de contrôle, et d'améliorer leurs comportements. Ils peuvent les ajuster en fonction de l'évolution dynamique du système qu'ils contrôlent [Celik et Ertugrul, 2010]. Cela nécessite un comportement adaptatif et proactif (*i.e.*, un comportement résilient) pour contrôler les performances du système en particulier face à des situations inattendues. En s'appuyant sur des outils d'aide tels que les systèmes de prédiction et/ou d'apprentissage, les opérateurs pourraient mieux gérer ces menaces.

## 4 Système prédictif et/ou d'apprentissage d'aide à la résilience

### 4.1 La prédiction

L'étymologie latine du terme prédire est composée du préfixe *prae-* qui signifie "avant" et du verbe *dicere* qui signifie "dire" ainsi donc *praedicere* signifiant littéralement "dire avant". La prédiction consiste à formuler des hypothèses sur le ou les événements futurs le plus souvent, à partir de l'analyse des connaissances et des faits présents et éventuellement passés. Prédire l'évolution d'un paramètre (d'un signal, d'une performance, etc.) d'un système permet d'anticiper l'évolution future de ce paramètre afin d'entreprendre des actions préventives. Par identification, la prédiction correspond au pronostic des états futurs présentés sur la base de l'identification de l'état courant et le diagnostic des états précédents. La prédiction est utilisée dans de nombreux domaines notamment dans la météorologie, pour la surveillance d'applications industrielles, dans les services financiers, l'assurance, la santé, les télécommunications, etc.

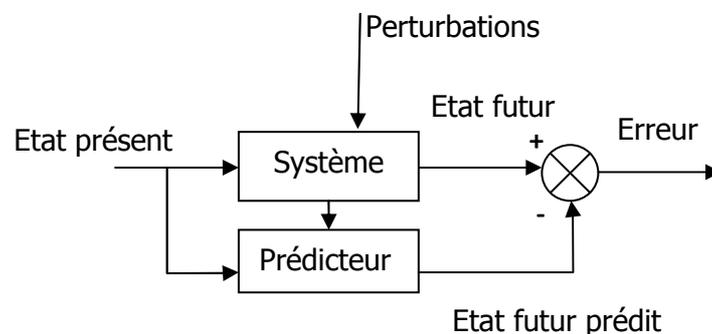


Figure 17. Principe de la prédiction de l'état d'un système

La Figure 17 présente le principe de la prédiction : étant donné un ensemble de données ou de connaissances sur l'état présent (et éventuellement sur l'état passé), on souhaite prédire l'état futur du système. La connaissance de l'état présent du système et les lois d'évolution de ses paramètres peut rendre la prédiction possible : c'est le cas par exemple de la prédiction des éclipses (lunaire, solaire). En effet, les lois mathématiques et physiques des mouvements orbitaux du système terre-lune-soleil maintenant connues permettent de déterminer les positions orbitales du système terre-lune-soleil, ce qui permet de dater les éclipses mais également l'endroit où se produiront ces éclipses. Nous avons également les prévisions météorologiques réalisées sur la base d'un ensemble de données telles que la pression, la température, l'humidité, la direction et la vitesse du vent, les précipitations, les conditions nuageuses, etc. Un modèle de prévision numérique du temps est dégagé sous forme d'équations mathématiques offrant une approximation du comportement de l'atmosphère. Grâce aux moyens techniques (radar, télécoms, informatique) de nos jours, les données sont traitées et un ensemble de prévisions peuvent alors être dégagées.

Un autre principe de prédiction est que les mêmes causes produisent les mêmes effets. En connaissant l'état présent d'un paramètre du système, on recherche dans les connaissances passées, une situation similaire au cas présent. Ainsi, cet état passé constitue la prédiction du paramètre étudié. La prédiction est relative à la sortie qu'aurait le système en l'absence de perturbations puisque ces dernières modifient constamment l'évolution réelle du système dans le temps. Cette approche de prédiction est relative aux techniques de régression par exemple pour la prédiction de série temporelle utilisée notamment dans la finance. Il s'agit alors d'analyser l'historique des données du marché financier et de tenter de prédire par approximation à l'aide de modèles mathématiques les évolutions futures de ces marchés.

Il peut être nécessaire d'introduire un retour d'information (Feedback) pour renforcer la précision de la prédiction. Cela consiste à prendre en compte l'erreur de prédiction dans le but d'atteindre les objectifs de prédiction prédéfinis. Le renforcement est associé à une fonction d'apprentissage dans le but soit de renforcer ou de corriger les paramètres de l'outil de prédiction, soit de renforcer les connaissances par l'acquisition d'informations nouvelles qui seront utilisées ultérieurement. La Figure 18 présente le principe du renforcement de la prédiction par apprentissage itératif [Polet *et al.*, 2012]. Au travers de l'apprentissage itératif, le système exécute la même tâche à plusieurs reprises (cycles), il devient alors intéressant d'utiliser les informations des cycles précédents en vue de réduire l'erreur de prédiction à la prochaine exécution de cette tâche.

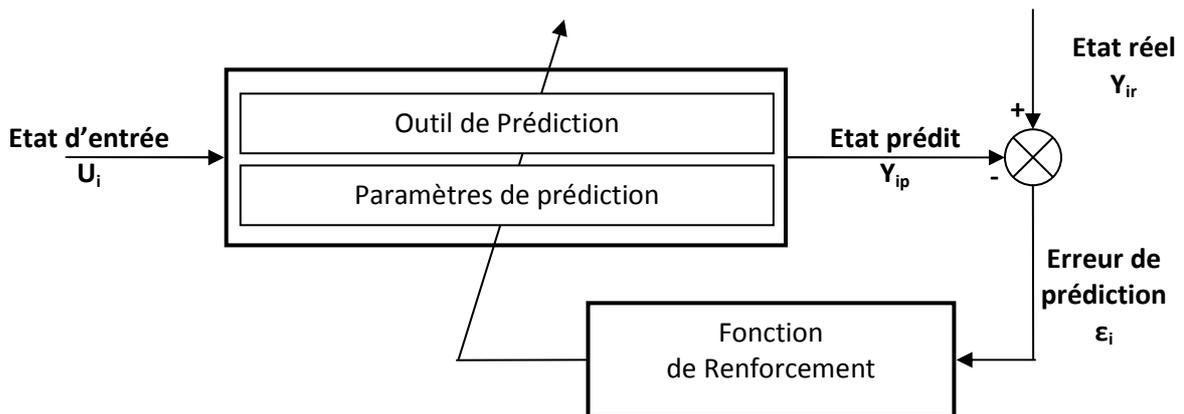


Figure 18. Principe de la prédiction basé sur l'apprentissage ou renforcement itératif (adaptée de [Polet *et al.*, 2012])

Les approches et techniques utilisées pour la prédiction notamment par réseau de neurones sont relatives aux techniques de régression et d'apprentissage.

## 4.2 L'apprentissage

L'apprentissage est un processus d'acquisition de connaissances, de compétences ou d'attitudes (apprentissage humain) par modélisation (observation, imitation) ou par action (tâtonnement, intuition). Il permet d'améliorer les performances d'un système en fonction des ressources et/ou des compétences disponibles [Buche, 2002]. En ingénierie, l'apprentissage artificiel est vu comme le développement, l'analyse et l'implémentation de méthodes automatisables qui permettent au système d'évoluer afin de remplir des tâches qu'il est difficile ou impossible d'effectuer par les moyens classiques. Trois catégories d'approches d'apprentissage se distinguent selon le mode d'apprentissage qu'ils emploient et le résultat final souhaité :

- L'apprentissage supervisé: l'apprenant ou le système est guidé par un "expert" qui lui fournit une indication sur les actions à exécuter pour améliorer ses performances [Yannakakis *et al.*, 2009]. Le plus souvent, l'apprenant cherche à déterminer ou prédire automatiquement des actions (ou des règles) à partir d'indications ou d'une base de données d'apprentissage contenant des «exemples» ou des cas déjà traités et validés.
- L'apprentissage non supervisé: aucun expert n'est requis, l'apprenant ou le système doit découvrir par lui-même les actions à exécuter; l'objectif étant de permettre une extraction de connaissances organisées à partir des données collectées.
- L'apprentissage renforcé: l'apprenant ou le système apprend comment se comporter en fonction de son interaction avec son environnement. Chaque action a un certain impact sur l'environnement, et ce dernier fournit une rétroaction ou *feedback* sous forme de "récompenses" qui permet d'indiquer si l'action générée est appropriée ou non [Wiering et Van Hasselt, 2008; Shih *et al.*, 2009].

L'apprentissage supervisé consiste à apprendre à partir d'exemples ou d'indications fournis par un superviseur compétent externe. Cette technique d'apprentissage n'est pas suffisante pour l'apprentissage d'un Système Homme-Machine en interaction. Il est souvent impossible d'obtenir des exemples de comportements souhaités qui soient à la fois pertinents et représentatifs de toutes les situations critiques dans lesquelles l'opérateur humain ou le système se doit d'agir. En cas de menaces nouvelles inconnues, où le mode d'apprentissage devrait être plus bénéfique, l'ensemble Homme machine devrait être capable d'apprendre de sa propre expérience [Sutton et Barto, 1998]. Plutôt que d'utiliser les instructions prédéfinies (apprentissage supervisé), l'opérateur interagit dynamiquement par des essais-erreurs avec son environnement, un feedback est généré sous forme d'indicateur pour orienter l'apprentissage afin d'obtenir l'état de fonctionnement désiré [Quah *et al.*, 2005].

Pour un système sujet à des perturbations inconnues ou imprévues, l'apprentissage renforcé paraît plus adapté de par l'interaction du système avec son environnement pour la recherche d'un comportement décisionnel optimal dans l'incertain. Ce type d'apprentissage est lié à la théorie du contrôle optimal et poursuit un double objectif:

- conduire de manière optimale un système au cours du temps : c'est le contrôle optimal en automatique,
- apprendre ou réapprendre le contrôle optimal des systèmes par l'expérience.

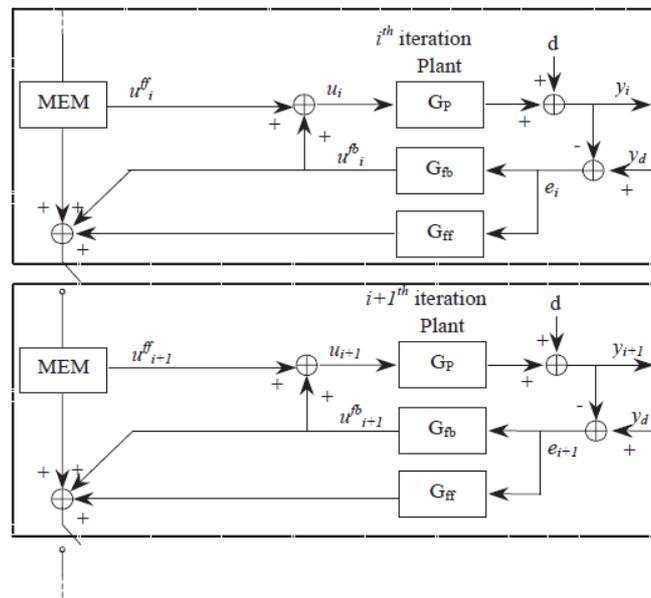
Néanmoins, les trois modes d'apprentissage présentés précédemment ont été largement utilisés dans la littérature notamment pour des applications de planification, de contrôle ou de prise de décision de la composante machine ou automatique des systèmes sociotechniques, d'où leur nom d'apprentissage machine (*machine learning*).

Puis, le concept de l'apprentissage a été intégré dans les domaines de l'automatique et de l'informatique pour améliorer le champ d'action des systèmes artificiels [Sutton et Barto, 1998]. Des nombreux auteurs se sont intéressés au contrôle de l'apprentissage itératif ou "Iterative Learning Control (ILC)". Il permet aux systèmes linéaires et non-linéaires d'améliorer leur performance à travers un simple processus d'apprentissage renforcé. Dans la section suivante, nous présentons le principe des ILC et une synthèse des structures de contrôle proposées dans la littérature.

### **4.3 Iterative learning control**

De nombreux systèmes industriels fonctionnent de manière répétitive notamment au travers de tâches cycliques. Il devient intéressant d'utiliser les informations des cycles précédents en vue de réduire l'erreur de prédiction à la prochaine exécution de cette même tâche : c'est l'approche de commande ou de contrôle par apprentissage itératif (*Iterative learning control*). Cette commande consiste à trouver un mécanisme itératif adéquat permettant d'apprendre les erreurs des cycles antérieurs et améliorer progressivement l'exécution du cycle suivant. Ces systèmes de commande se présentent sous la forme de structure de commande combinée dite "*feedforward-feedback controllers*". Le "feedforward controller" vise à évaluer les futurs comportements en se basant sur l'état actuel du système et le management des états précédents. Le "feedback controller" vise à récupérer des connaissances erronées, à les affiner ou à créer de nouvelles connaissances permettant de renforcer les capacités de la structure de commande [Vanderhaegen, 2010b]. Le "feedforward-feedback controller" est un processus qui consiste à utiliser les connaissances actuelles relatives aux actions précédentes afin d'évaluer les futures décisions [Ouedraogo *et al.*, 2010a ; Ouedraogo *et al.*, 2010b]. Un grand nombre de travaux de recherche ont proposé des contrôleurs basés sur l'approche "feedforward-feedback" par utilisation de différentes méthodes [Xu *et al.*, 2004; Lee *et al.*, 2000; Jang *et al.*, 1995; Lee et Lee, 2007; Yan et Shiu, 2008; Vanderhaegen *et al.*, 2009].

La Figure 19 présente une structure de commande combinée feedforward-feedback basée sur l'apprentissage itératif [Xu *et al.*, 2004]. L'indice  $i$  désigne la  $i^{\text{ème}}$  itération. Par conséquent le signal de référence, le signal de sortie, le signal de commande et le signal d'erreur, sont notés respectivement  $y_{d,i}$ ,  $y_i$ ,  $u_i$ ,  $e_i$  à la  $i^{\text{ème}}$  itération.  $G_p$ ,  $G_{fb}$  et  $G_{ff}$  sont respectivement les fonctions de transfert du système, les commandes feedback et feedforward.



**Figure 19. Structure de commande combinée feedforward-feedback [Xu *et al.*, 2004]**

La commande anticipative ( $u_{i+1}$ ) donnée dans l'équation 11, est alors relative à l'erreur précédente ainsi qu'à l'erreur courante au travers les structures feedforward (prédiction) et feedback (renforcement itératif) :

$$\begin{aligned}
 u_{i+1} &= u_i^{ff} + G_{ff} e_i + G_{fb} e_{i+1} \\
 &= u_i + (G_{ff} - G_{fb}) e_i + G_{fb} e_{i+1}
 \end{aligned}
 \tag{11}$$

Il est alors possible de réduire voire d'éliminer l'erreur précédente ( $e_i$ ) par le management des fonctions des contrôleurs feedback/feedforward. Le Tableau 7 présente une synthèse de différentes structures de contrôle par apprentissage itératif. Ces structures sont essentiellement utilisées dans les procédés ou les systèmes techniques (robot manipulateur, moteur, suivi de trajectoire, etc.) aux cours de tâches répétitives pour le suivi et le contrôle notamment de la trajectoire. Ces structures n'intègrent pas l'opérateur humain dans le système à contrôler. L'originalité de la structure proposée par [Vanderhaegen *et al.*, 2009] est qu'elle est appliquée à un Système Homme-Machine dans le but de prédire les comportements humains pour la gestion des erreurs, notamment les violations intentionnelles de protocoles de sécurité par l'opérateur.

**Tableau 7. Structures feedforward-feedback pour l'apprentissage itératif**

Références	Formules	Principe
Xu <i>et al.</i> , 2004 Lee <i>et al.</i> , 2000;	$u_i = u_{i-1} + G_{ff}e_{i-1} + G_{fb}e_i$	Utilisation des erreurs courante $e_i$ et précédentes $e_{i-1}$ pour évaluer l'entrée courante $u_i$
Xu <i>et al.</i> , 2004	$u_i = u_{i-1} + (G_{ff} - G_{fb})e_{i-1} + G_{fb}e_i$	Utilisation des erreurs courante $e_i$ et précédentes $e_{i-1}$ pour évaluer l'entrée courante $u_i$
Jang <i>et al.</i> , 1995	$u_i = \gamma(v_i = u_{i-1} + G_{ff}e_{i-1} + G_{fb}e_i)$	Ajout d'un saturateur d'entrée $\gamma(\cdot)$
Yan and Shiu, 2008	$u_i = u_i^{ff} + u_i^{fb} - u_i^d$ $= G_{ff}(e_{i-1}, u_{i-1}) + G_{fb}e_i - G_d(e_{i-1}, u_{i-1})$	Evaluation de l'entrée courante par l'utilisation de l'erreur courante $e_i$ et les couples de données précédentes $(e_{i-1}, u_{i-1})$ à travers une configuration feedforward et un observateur de perturbations.
Vanderhaegen <i>et al.</i> , 2009	$u_i = e_i + G((e_{i-1}, u_{i-1}), (e_{i-2}, u_{i-2}), \dots, (e_0, u_0))$	L'évaluation de l'entrée courante $u_i$ par l'utilisation de l'erreur courante $e_i$ et des couples de données précédentes $((e_{i-1}, u_{i-1}), \dots)$

La plupart des commandes feedforward et feedback sont définies à partir des modèles mathématiques (équation d'état notamment) du procédé à commander. Certaines structures incluent des observateurs ou des saturateurs d'entrées pour la gestion des perturbations mais ne sont pas définies pour gérer les situations inattendues ou sans précédent. Ces structures de commande feedforward-feedback associées à l'apprentissage itératif sont similaires au concept de commande prédictive. Ce modèle est le plus souvent représenté sous forme de fonction de transfert ou d'équations d'état à partir desquelles on peut prédire les valeurs futures des variables contrôlées jusqu'à un certain horizon.

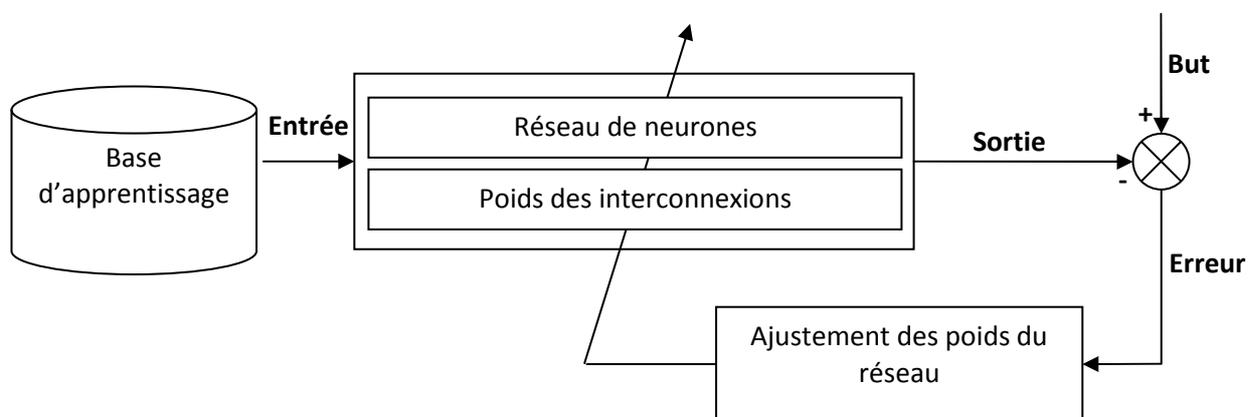
Pour appliquer les principes de ces structures de commande sur les SHM, il faudrait alors disposer d'un modèle du système. Par manque de modèle consensuel de l'opérateur humain, il faut alors recourir à d'autres outils pour la mise en place de systèmes prédictifs d'aide à l'amélioration de la résilience des SHM.

#### **4.4 Prédiction par réseau de neurones**

La prédiction consiste à déterminer le comportement futur d'un système en fonction de son comportement passé. On dispose d'une base d'exemples ou base d'apprentissage constituée d'un ensemble de mesures des entrées/sorties caractérisant le comportement passé du système. Par apprentissage à partir des exemples, le système de prédiction déduit la relation entre les entrées/sorties. Pour une nouvelle situation, on est alors capable de prédire le comportement futur du système.

L'apprentissage consiste à la modélisation dynamique du système, *i.e.*, trouver les relations mathématiques qui décrivent le comportement du système correspondant à l'évolution des sorties du système en fonction de celle de ses entrées. Ce type de prédiction peut être résolu par un réseau de neurones. Les réseaux de neurones sont composés d'un grand nombre d'unités de traitement (ou neurones) interconnectées, divisés en entrées, en sorties, et en nœuds cachés. Le fonctionnement du réseau de neurone est fortement influencé par la connexion des éléments entre eux. Le réseau est optimisé par des méthodes d'apprentissage pour des tâches spécifiques (reconnaissance de caractères, prédiction de paramètres, etc.) en ajustant les valeurs des connexions (ou poids ( $w$ )) entre les neurones.

La Figure 20 présente le principe d'apprentissage des réseaux de neurones. L'apprentissage consiste à un ajustement des poids basé sur la comparaison entre la réponse du réseau (ou sortie) et un but à atteindre, jusqu'à ce que la sortie corresponde au mieux. Le réseau de neurones "apprend" à partir d'exemples issus d'une base dite d'apprentissage. Le réseau optimisé obtenu est ensuite capable d'effectuer des opérations de prédiction ou de classification à partir de nouvelles données issues de la base de validation (Figure 21).



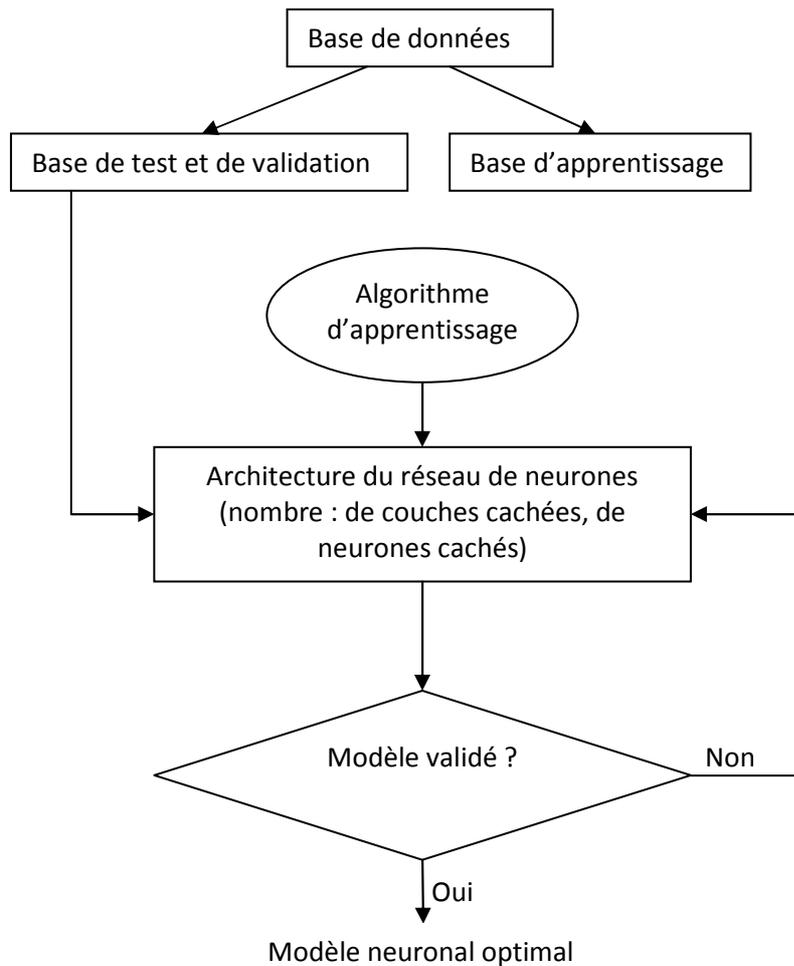
**Figure 20. Principe de l'apprentissage des réseaux de neurones**

La capacité des réseaux de neurone à apprendre des exemples donnés (ou base d'apprentissage) en fait des outils très appréciés car il n'y a pas besoin de modéliser mathématiquement chaque cas individuel. La Figure 21 présente l'algorithme de conception d'un réseau de neurones pour la prédiction. L'ensemble des données (entrées/sorties) constitue la base de données de travail qui est répartie entre la base d'apprentissage et la base qui servira de test et de validation du modèle de prédiction. La conception proprement dite du réseau de neurones consistera à choisir le type du réseau de neurones notamment par le choix de différents paramètres tels que :

- la topologie des connexions entre les neurones : les réseaux feedforward, les réseaux récurrent et les cartes auto organisatrice.
- la fonction d'activation en sortie utilisée : sigmoïde, échelon, fonction linéaire ou gaussiennes, etc.
- l'algorithme d'apprentissage utilisé : rétropropagation du gradient, apprentissage de Widrow-Hoff ou de Hebb, etc.

En fonction du type d'apprentissage associé (supervisé ou non, renforcé), on distingue les différents réseaux de neurones usuels :

- le Perceptron MultiCouches (PMC), un réseau de type feedforward associé à un apprentissage réseau supervisé.
- le Réseau à fonctions de base Radiale (RBR) [Zemouri, 2003; Touzet, 1992].
- les cartes auto organisatrice ou réseau de Kohonen associé à un apprentissage non supervisé.
- etc.



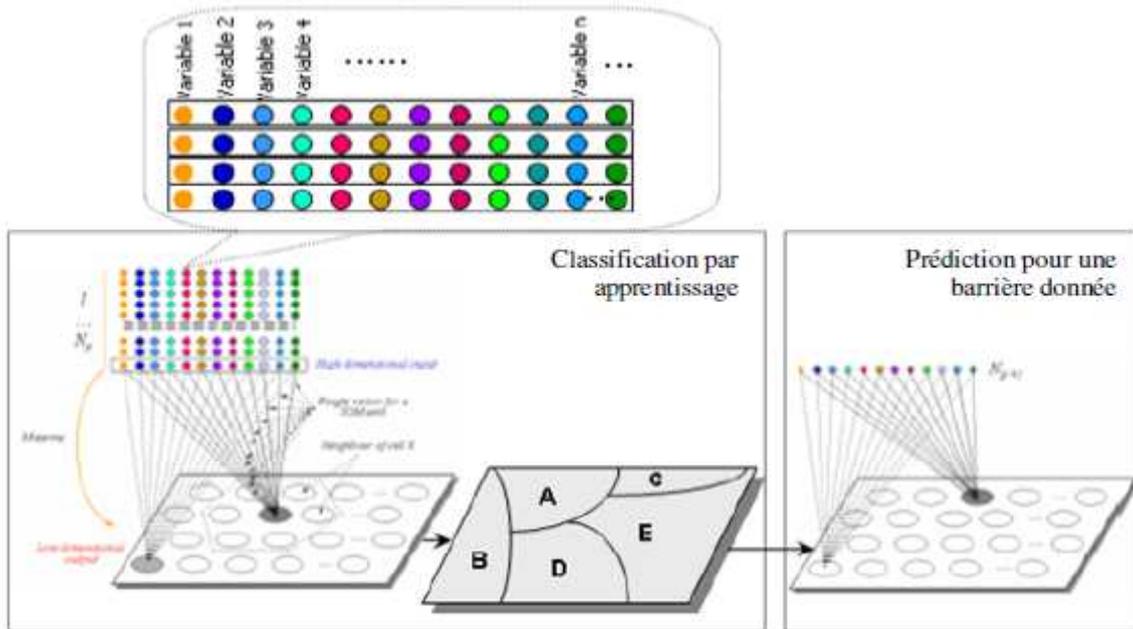
**Figure 21. Organigramme de conception d'un réseau de neurones**

Les réseaux de neurones ont été utilisés avec succès pour résoudre de nombreux problèmes d'ingénierie dans divers domaines allant de la prédiction financière, prédiction de consommation (d'eau, d'électricité, etc.) à la prédiction de trafic. Dans le cadre de la prédiction des erreurs humaines, la prédiction par réseau de Kohonen a été développée au sein de l'équipe Système Homme-Machine de notre laboratoire. La démarche se base sur le modèle Bénéfices, Coûts et Déficits potentiels (BCD) [Zhang, 2004 ; Vanderhaegen, 2004 ; Vanderhaegen *et al.*, 2011 ; Polet *et al.*, 2012]. Elle a pour but la prédiction des franchissements de familles de barrières (A, B, C et D, E). Les évaluations subjectives des critères (en termes de Bénéfices, Coûts et Déficits potentiels) constituent les variables ou données d'entrée du réseau de neurones. L'objectif de l'étude expérimentale est de mesurer l'influence du franchissement ou du retrait de barrières sur les critères et de pouvoir les prédire.

Cette approche s'inspire des travaux de Kohonen basés sur les cartes auto-organisatrices (Self-Organizing Map, SOM). Ce type de réseau de neurones permet de représenter graphiquement le résultat d'une classification des éléments étudiés. La prédiction des franchissements de barrières par réseau de neurones présente deux phases : une phase d'apprentissage et une phase de prédiction. Au cours de la phase d'apprentissage le réseau de neurones intègre les vecteurs d'entrée et les classe. Les éléments des vecteurs d'entrées notés *variable 1, ..., variable n*, sont les évaluations des Bénéfices, des Coûts et des Déficits potentiels associés aux comportements observés de l'opérateur humain *i.e.* le franchissement ou non de barrières.

La classification de la totalité de ces vecteurs constitue la carte organisée.

Pour la prédiction, seules les évaluations des Bénéfices, Coûts et Déficits potentiels constituent un vecteur d'entrée. Le réseau de neurones recherche sur la carte la zone dans laquelle il faut placer ce vecteur. A cette zone lors de la phase d'apprentissage est associé un comportement (franchissement ou non de barrière) qui est le résultat de la prédiction. La Figure 22 présente une illustration graphique de la méthode de prédiction par réseau de Kohonen.



**Figure 22. Illustration graphique de la méthode de prédiction par réseau de Kohonen**

Cette méthode a permis d'obtenir des taux de prédiction correcte des franchissements de familles de barrières de l'ordre de 90%.

Pour faire face aux évènements sans précédents, le Système Homme-Machine doit être résilient. Cette résilience n'est pas un processus statique mais dynamique. Il faut donc des méthodes, des outils ou des démarches permettant l'amélioration continue des propriétés de résilience du SHM. Pour les opérateurs humains, il s'agit de mettre en place des méthodes de formation, de raisonnement et surtout d'entraînement à la prise de décision en situation critique. Pour le système technique, il faut mettre en œuvre des outils d'aide pour améliorer la réaction et la récupération des perturbations critiques. Ces outils seront basés sur des systèmes prédictifs qui permettront d'anticiper l'évolution de l'état du SHM afin de préconiser les actions à entreprendre pour faire face à l'imprévu. Ces systèmes prédictifs pourraient être dotés de structures de contrôle ou d'apprentissage itératif pour fiabiliser et renforcer les résultats de prédiction.

## 5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous présentons les démarches et les outils d'aide à l'amélioration des caractéristiques de résilience d'un système : l'anticipation, la réaction et la récupération face à l'imprévu.

La problématique de réaction à l'imprévu au travers le besoin de mise en œuvre de l'ingénierie de résilience ou "resilience engineering", nous permet de présenter les quatre étapes de cette approche ainsi que les mécanismes de défenses ou les parades issus essentiellement de la sûreté de fonctionnement des systèmes.

Par la suite, nous avons détaillé quelques démarches et outils déjà utilisés dans les domaines communément associés à la gestion de l'imprévu et concourant à l'amélioration de la réactivité des opérateurs humains. Les éventuels avantages et limites de ces méthodes sont également abordés.

Dans la dernière partie de ce chapitre, nous abordons le besoin d'outils d'aide pour assister les opérateurs humains dans leurs activités et actions d'amélioration de la résilience du SHM au travers le développement d'outils de prédiction (en particulier par réseau de neurones) associés à des systèmes d'apprentissage artificiels itératif pour le renforcement de la prédiction. Le SHM ainsi doté d'outils d'analyse, il sera possible d'évaluer et de contrôler sa la résilience ; le but étant d'améliorer les caractéristiques de résilience du SHM par l'anticipation et la prise de décisions préventives en apprenant de la gestion positive ou négative des menaces imprévues.



---

## **Chapitre 3. Elaboration d'indicateurs de résilience et leur intégration dans des processus d'apprentissage renforcé**

---

Chapitre 3. Elaboration d'indicateurs de résilience et leur intégration dans des processus d'apprentissage renforcé .....	61
1 Introduction.....	62
2 Cadre des travaux de la thèse.....	63
2.1 Principe cadre des contributions de la thèse.....	63
2.2 Evaluation de l'état du Système Homme-Machine.....	64
3 Evaluation multicritères de la résilience.....	66
3.1 Couple d'indicateurs de la résilience .....	66
3.2 Exemple d'évaluation de la résilience.....	68
3.3 Construction d'un vecteur d'indicateurs de la résilience.....	69
4 Intégration des indicateurs de résilience dans des processus d'apprentissage ..	71
4.1 Algorithme de Kohonen .....	73
4.2 Structure d'estimation par apprentissage renforcé.....	76
4.3 Renforcement des paramètres de la fonction d'estimation .....	78
4.4 Renforcement de la base de connaissance.....	79
4.5 Double renforcement.....	80
5 Conclusion .....	83

## 1 Introduction

Dans le chapitre 1, nous avons présenté un état de l'art du concept de résilience qui nous a permis de retenir une définition de la résilience d'un Système Homme-Machine. Une liste non exhaustive de propositions de mesures de la résilience a été ensuite présentée mettant en lumière les limites de ces mesures. Dans le chapitre 2, nous avons présenté quelques méthodes et outils concourant à une aide à la réaction et à la récupération des SHMs face aux situations critiques ainsi que leurs apports et limites éventuels. Dans le cadre de notre étude, nous nous positionnons dans le contexte d'un SHM faisant face à des situations critiques consécutives à l'occurrence d'évènements sans précédents. Nous présentons donc une méthode de mesure de la résilience et l'exploitation d'indicateurs obtenus dans des processus d'apprentissage.

Dans la première partie de ce chapitre, nous présentons le cadre général des travaux de notre thèse. Les problématiques liées au besoin de mesure de la résilience des systèmes et à la caractérisation des situations critiques en termes de résiliences sont abordées. Nous décrivons ensuite le principe et les étapes de développement de nos différentes contributions.

Dans la seconde partie, nous proposons une méthode d'évaluation multicritère de la résilience d'un SHM. Cette méthode est basée sur la détermination d'un couple d'indicateurs de la résilience dite locale et globale à partir de la définition de critères représentatifs de l'état du SHM. Un exemple de calcul de la résilience est détaillé afin de démontrer et d'évaluer la pertinence de ces indicateurs.

Dans la dernière partie de ce chapitre, nous abordons l'exploitation des indicateurs de résilience obtenus dans des processus d'apprentissage renforcé pour estimer l'évolution de l'état du système (indicateurs de résilience non mesurables "en ligne") afin de comprendre et d'apprendre des situations critiques. Le principe de l'algorithme de Kohonen est présenté et adapté par le développement d'algorithmes d'apprentissage renforcé pour l'estimation des indicateurs de résilience. Trois algorithmes sont ainsi développés et présentés en détails.

## 2 Cadre des travaux de la thèse

Les opérateurs humains constituent le principal élément d'amélioration de la résilience au sein du SHM en considérant les décisions et les actions qu'ils appliquent afin d'assurer la continuité du fonctionnement du système. En effet, ces opérateurs humains peuvent s'adapter à différentes situations notamment de par leur expérience et leur grande connaissance du système technique. Mais face à des situations critiques, les opérateurs, pour appréhender la situation en cours, pourraient avoir besoin d'outils d'aide (à la décision, à l'action, au diagnostic, etc.) pour évaluer et corriger les décisions et les actions qu'ils prennent. Les décisions ou les actions des opérateurs devront par ailleurs être basées sur des indicateurs représentatifs de l'état du Système Homme-Machine.

Dans notre présente étude, nous nous positionnons dans le contexte d'un SHM faisant face à des situations critiques consécutives à l'occurrence d'événements sans précédent. Les chapitres précédents, nous ont permis d'aborder les besoins du contexte considéré :

- il n'y a pas de méthode ou d'outil pour mesurer la résilience des SHM en situation critique ;
- il n'y a pas de méthode ou d'outil pour appréhender la situation sans précédent en cours et pour apprendre de celle-ci afin de mieux réagir par la suite.

Les contributions de la thèse visent à répondre aux deux questions posées. Nous mettons en œuvre une méthode pour mesurer la résilience et l'exploitation de cette mesure pour apprendre de la situation. Nous posons tout d'abord les bases théoriques de nos contributions.

### 2.1 Cadre des contributions de la thèse

Nous résumons sur la Figure 23 le principe des contributions de la thèse. Il s'agit de proposer une méthode de mesure de la résilience d'un SHM faisant face à des situations critiques. Nous abordons ensuite l'exploitation de ces indicateurs de résilience dans des processus d'apprentissage pour évaluer la situation et pour apprendre de celle-ci.

Face à l'occurrence des situations critiques, les actions et décisions des opérateurs sont dictées notamment par l'état du SHM. Pour un système de transport par exemple, face à une situation critique, les opérateurs pourront privilégier des critères comme la sécurité du système, en appliquant des actions qui optimiseront ce critère. Un groupe de militaire pourrait privilégier la mission qu'il doit accomplir au détriment d'autres critères. Comme illustré dans le point 1 de la Figure 23, il nous faudrait donc définir les critères les plus pertinents du SHM pour l'élaboration de la méthode de mesure de la résilience. L'évolution de l'état du système est interprétée en termes d'indicateurs de résilience multicritères évalués à chaque itération (point 2 de la Figure 23). Dans le troisième point, nous développons des processus d'apprentissage renforcé pour l'évaluation d'indicateurs de résilience notamment ceux associés à des critères non mesurable directement ou en temps réel ; ce qui aboutit à l'évaluation complète de l'état du SHM en termes d'indicateurs de résilience.

L'état du SHM en termes de résilience permettrait d'orienter les opérateurs humains dans l'élaboration des solutions (*e.g.*, procédures, tâches de maintenance, de contrôle ou de diagnostics, etc.) pour réagir et récupérer des situations critiques. Néanmoins, en fonction de leur définition, certains critères pourraient s'avérer non mesurables directement, nous préconisons de les estimer "en ligne" par l'intermédiaire de processus d'apprentissage artificiel renforcé.

Les critères à définir devront par ailleurs être représentatifs de l'état du SHM et permettre de prendre en compte la contribution des différents éléments du système, *i.e.*, les

opérateurs, la machine et l'environnement de travail. Nous abordons dans la section suivante, les possibilités d'évaluation de l'état d'un SHM.

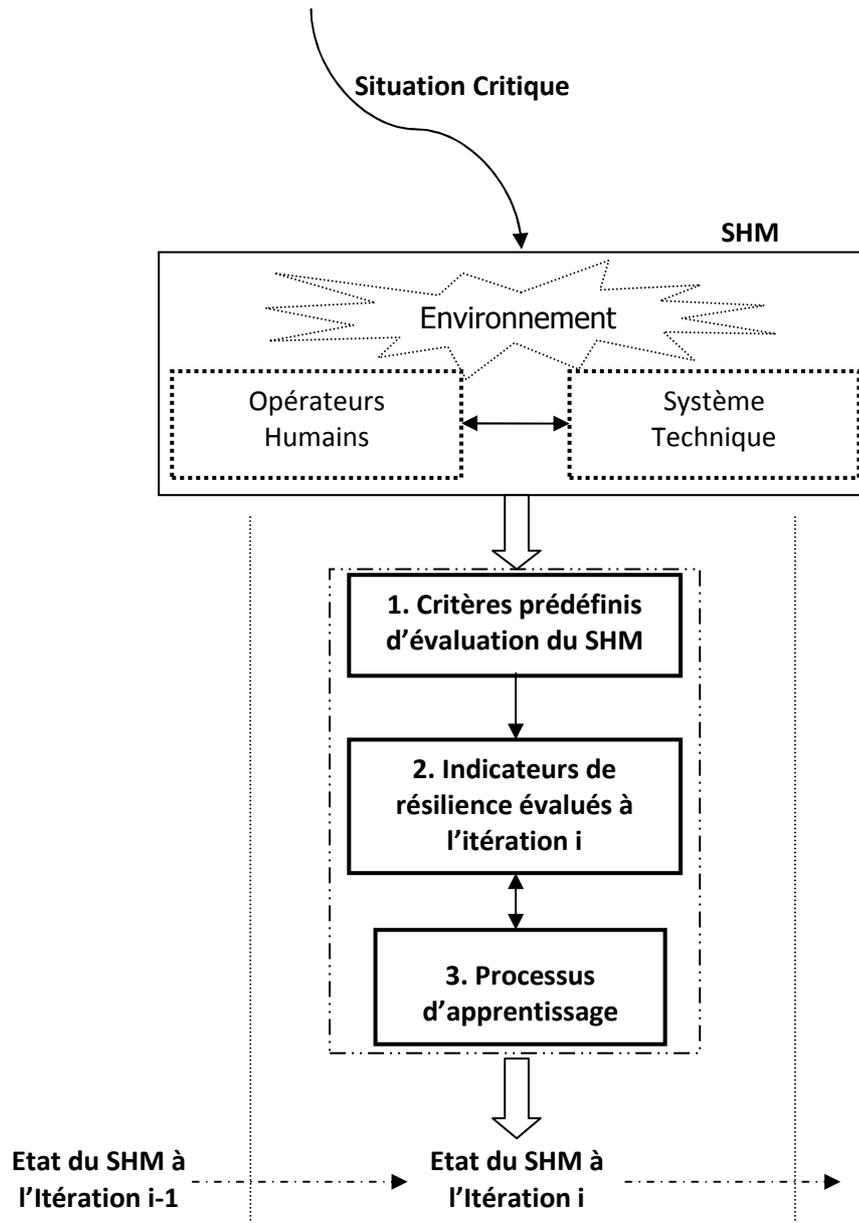


Figure 23. Faisabilité de la mesure de la résilience d'un SHM face à une situation critique et son intégration dans un processus d'apprentissage

## 2.2 Evaluation de l'état du Système Homme-Machine

L'état d'un Système Homme-Machine dépend de chaque élément ou agent composant du système [Ziéba, 2009; Ben-Yahia, 2012]. Trois types d'éléments sont identifiables pour le SHM : le ou les opérateurs humains caractérisés par un état vectoriel noté  $(e_{oh1}, e_{oh2}, \dots, e_{ohn})$ , l'état de la machine noté  $e_M$  et l'état de l'environnement noté  $e_E$ . La machine ou la composante technique est qualifiée de niveau opérationnel. Elle est caractérisée par des grandeurs physiques caractérisant alors la composante technique et informant par exemple sur sa position, sa vitesse, etc. Une modification de ces grandeurs physiques entraîne un changement d'état. L'opérateur humain est considéré comme un agent de niveau cognitif et décideur. Il est caractérisé par des grandeurs d'ordre physiologique, psychologique et cognitif, relatives notamment à sa capacité à atteindre un but en fonction de l'état de l'opérateur. Plusieurs paramètres peuvent influencer son état comme par exemple la charge

de travail, le niveau de connaissance ou d'expertise de l'opérateur. L'environnement est celui dans lequel évoluent les éléments présentés précédemment (opérateur humain et machine). Il est caractérisé par des grandeurs relatives aux composants le constituant et le fonctionnement organisationnel de ces derniers tels que le type de machine, le niveau et la forme de coopération ainsi que l'interaction entre opérateurs et machine. L'état du SHM noté  $e_{SHM}$  peut être alors défini par un vecteur composé des états décrits précédemment *i.e.*,  $e_{SHM} = (e_{oh1}, e_{oh2}, \dots, e_{ohn}, e_M, e_E)$ . Le SHM évolue généralement dans un environnement ouvert et dynamique, ce qui entraîne un changement fréquent de l'état de l'environnement et celui du SHM. L'occurrence des perturbations et leurs effets sur le SHM, les actions des opérateurs sont également des facteurs de changement d'état du système.

L'opérateur humain occupe une place très importante dans le contrôle/supervision des systèmes notamment par ses capacités d'adaptation. La contribution de l'opérateur humain doit donc être prise en compte dans l'évaluation des SHM. L'état de l'opérateur humain est caractérisé par un ensemble de facteurs (physiologiques, psychologiques et cognitifs) intrinsèques à l'homme. Les facteurs cognitifs reflètent le degré de la connaissance mis en œuvre par l'opérateur humain dans son activité (le traitement de l'information, la perception, les expériences, etc.). L'activité de l'opérateur reflète son niveau de qualification, de respect des règles et son niveau de connaissance. Les facteurs psychologiques sont liés notamment à des sentiments (de stress, d'insatisfaction, de frustration, d'inhibition ou même de culpabilité) ou à des idées ressenties par l'opérateur humain, ainsi qu'à ses manières de réagir. Les facteurs physiologiques sont relatifs aux informations indirectes sur l'activité mentale liée notamment aux fonctions sensorielles de l'opérateur humain. Ils comprennent, par exemple, l'activité oculaire (mouvements oculaires, direction du regard et clignements des paupières), la fréquence cardiaque et la parole. L'état interne de l'opérateur est difficilement observable. Il nécessite la mise en œuvre de systèmes de mesure lourds et intrusifs [Richard, 2012]. De plus, *a priori* il n'y a pas de modèle de l'opérateur humain. Pour l'évaluation de l'état du SHM, il faudrait se baser sur des facteurs observables et/ou mesurables relatifs aux comportements et/ou aux performances de l'opérateur humain. Les facteurs liés au comportement de l'opérateur humain portent sur des variables du système contrôlable par l'opérateur telles que la vitesse, l'accès aux commandes techniques (de la machine) par exemple pour l'ouverture/fermeture des portes pour un système de transport. Ces facteurs sont plus facilement observables et mesurables que les facteurs liés à l'état interne de l'opérateur. Les facteurs liés aux performances de l'opérateur humain sont également observables et mesurables. Ces facteurs sont relatifs à des variables subjectives tels que les performances de l'opérateur en termes de confort, de qualité de service, de respect des consignes de conduite et de sécurité, etc., pour un système de transport.

Pour l'évaluation des SHM, il s'agira alors de définir un ou plusieurs critères pertinents en fonction du type de SHM et des éléments qui le composent. Pour le cas spécifique de l'opérateur humain, l'évaluation de son état fonctionnel ou son aptitude à la tâche, se fera par l'intermédiaire de critères relatifs au comportement et à la performance de (des) l'opérateur(s) : mesures et estimation de certains paramètres du SHM, enregistrement de l'activité des opérateurs par des moyens techniques (audio, vidéos) et par des moyens d'analyse (analyses d'échanges verbaux), etc. Sur la base de ces critères, nous définissons des indicateurs de résilience locale et globale, dont nous présenterons les détails dans les sections suivantes.

### 3 Evaluation multicritères de la résilience

Plus la résilience d'un SHM est optimale, plus ce dernier pourrait faire face positivement à une situation critique engendrée par un évènement sans précédent ; d'où le besoin de méthode pour mesurer la résilience des SHM. Nous proposons dans cette section, une évaluation multicritère de la résilience au travers un couple d'indicateurs.

La contribution des opérateurs humains, les performances liées à la composante technique (la machine) ainsi que les performances organisationnelles de l'ensemble SHM doivent être prises en compte dans la définition des critères pertinents influençant l'état du SHM. Ces critères sont à la base de l'évaluation de la résilience des systèmes [Enjalbert *et al.*, 2010]. Pour l'opérateur humain, les critères peuvent être définis par rapport à certains facteurs externes affectant l'état du SHM comme les interactions entre opérateurs ou avec la machine, les exigences en termes de tâche à réaliser, etc. On définit également ces critères par rapport à des facteurs internes aux opérateurs tels que l'expérience individuelle, le stress, la charge de travail, etc. Le niveau de résilience du SHM faisant face à des évènements sans précédents dépendra alors de plusieurs critères. Du fait de l'interdépendance de certains facteurs affectant ces critères, on ne retiendra que certains critères prioritaires, *e.g.*, en raison de l'importance de la sécurité dans les systèmes de transport ferroviaire, le critère de sécurité du SHM faisant face aux perturbations imprévues peut être considéré comme un critère primordial.

Nous détaillons dans cette section, la méthode proposée pour évaluer la résilience d'un SHM. Cette méthode est basée sur le calcul d'un couple d'indicateurs de la résilience et est applicable pour l'évaluation de la résilience d'un SHM faisant face à une situation critique engendrée par un évènement sans précédent. Un exemple pratique de calcul de la résilience est présenté pour spécifier les apports de cette méthode de mesure de la résilience. Nous abordons enfin la construction d'un vecteur d'indicateurs multicritères de la résilience du SHM pour un instant  $t_i$  donné.

#### 3.1 Couple d'indicateurs de la résilience

L'évaluation de la résilience consistera en une interprétation des critères relatifs à l'état du SHM dans des conditions spécifiques, en l'occurrence face à des situations critiques. Afin d'évaluer la résilience, considérons par exemple, un critère  $S(t)$  prédéfini et dont l'évolution est illustrée sur la Figure 24. A partir de la courbe d'évolution de ce critère, on souhaite évaluer la résilience entre des instants spécifiques donnés. L'instant  $T_p$  correspond au début des effets sensibles des perturbations avec la courbe d'évolution du critère en dessous du seuil d'acceptabilité minimum. Ce seuil d'acceptabilité minimum est défini par rapport à une situation dite "de référence" correspondant au niveau optimal de fonctionnement du système. L'instant  $t_r$  correspond à l'instant de récupération du système, *i.e.*, la fin des niveaux de performances non acceptables. Le niveau de performance est dit non acceptable lorsque la courbe du critère est en dessous du seuil d'acceptabilité minimum.

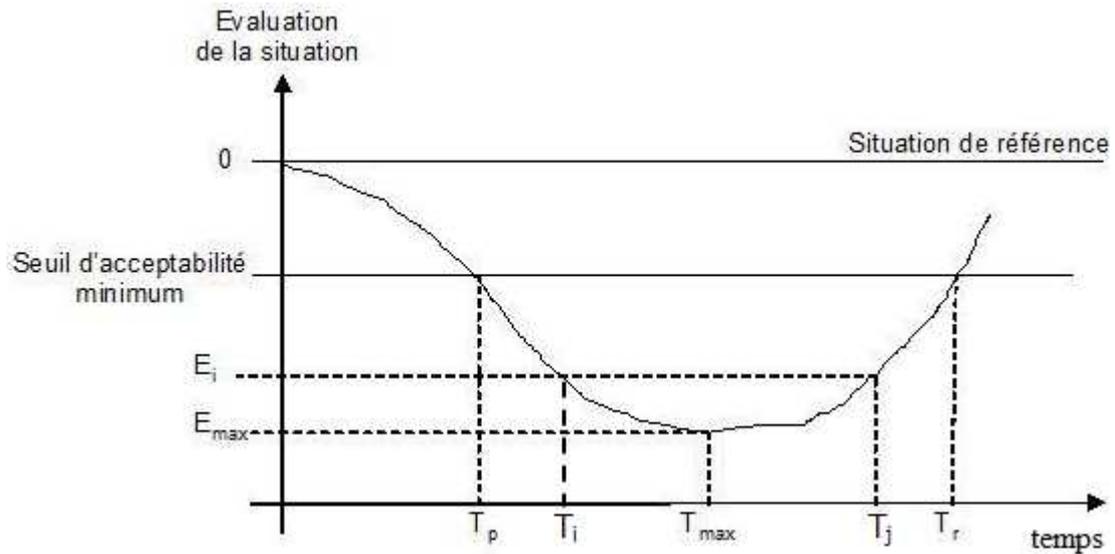


Figure 24. Evolution d'un critère pour l'évaluation de la résilience

A partir de ce critère, nous adoptons les propositions d'Enjalbert *et al.* [2011] pour définir une résilience locale (équation 12) :

$$\text{résilience locale} = \frac{dS(t)}{dt} = S'(t) \quad (12)$$

La résilience globale donnée par l'équation 13, correspond à une sommation ou à l'intégrale de la résilience locale durant une période ou un intervalle de temps :

$$\text{résilience globale} = \int_{t_p}^{t_r} \text{résilience locale}(dt) = \int_{t_p}^{t_r} S'(t)dt \quad (13)$$

La résilience locale correspond à une mesure instantanée de la résilience dont la valeur dépend des effets des perturbations imprévues sur le SHM. La valeur est négative lorsque le critère décroît, elle devient positive lorsque le système récupère d'une perturbation. La résilience globale est une sommation de la résilience locale au cours du temps en partant de l'apparition de la perturbation jusqu'à la récupération du système. Cette mesure est donc relative à l'évolution globale des performances du système en termes de résilience ou comment le système gère les perturbations au cours du temps.

Le Tableau 8 présente les évolutions possibles de la résilience pour les instants  $T_j$  (relatif à la décroissance du critère  $S(t)$ ),  $T_{max}$  (relative à l'instant où l'effet de la perturbation est maximale) et  $T_j$  (instant de récupération d'une perturbation). L'instant  $T_p$  correspond au début des effets notables de la perturbation *i.e.*, le niveau du critère est inférieur au seuil minimal acceptable. L'instant  $T_r$  est relative à l'instant de récupération du système *i.e.*, lorsque le niveau du critère redevient acceptable comme illustré sur la Figure 24.

Tableau 8. Evolutions possibles de la résilience locale et globale

Temps	$t_p$	$t_i$	$t_{max}$	$t_j$	$t_r$
Résilience locale	$S'(t_p)$	$S'(t_i)$	0	$S'(t_j)$	$S'(t_r)$
Résilience globale	0	$\int_{t_p}^{t_i} S'(t)$	$\int_{t_p}^{t_{max}} S'(t)$	$\int_{t_p}^{t_j} S'(t)$	$\int_{t_p}^{t_r} S'(t)$

### 3.2 Exemple d'évaluation de la résilience

Par exemple, nous considérons un critère dont l'évolution est similaire au critère  $S(t)$  de la Figure 24. Par identification paramétrique, nous retenons une courbe parabolique (de valeur nulle à l'instant  $t=0$ ) donc de la forme :  $y=a*t^2+b*t+c$  avec  $c=0$ . On obtient l'équation 14 :

$$\text{critère} \cong S(t) = 0.02 * t^2 - 2 * t \quad (14)$$

La Figure 25 représente la courbe d'évolution du critère  $S(t)$  définie par l'équation 3. La situation de référence est le niveau  $S(t)=0$ . On considère le seuil d'acceptabilité minimum fixé à  $S(t)=-10$ .

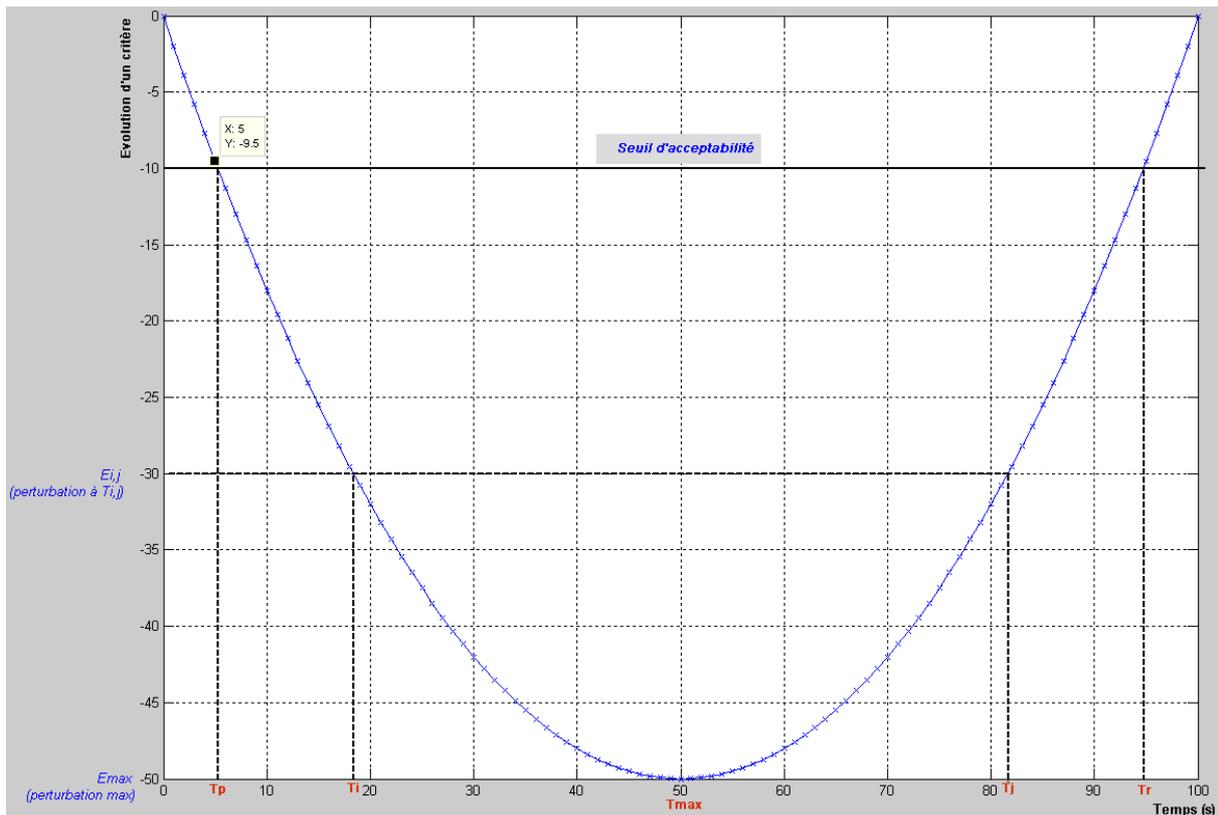


Figure 25. Exemple d'évolution d'un critère pour l'évaluation de la résilience

Dans l'intervalle  $[0, t_{max}]$ , la courbe du critère est progressivement décroissante. A partir de l'instant  $t=t_{mp}$ , on entre dans le niveau dit inacceptable. Le niveau minimal du critère est atteint à  $t=t_{max}$ . Cet instant correspond également à l'instant où la courbe du critère devient progressivement croissante. Le niveau du critère redevient acceptable à partir de l'instant  $t=t_r$ . La résilience locale (par application de l'équation 12) est donnée l'équation 15 :

$$\text{résilience locale} = \frac{dS(t)}{dt} = S'(t) = 0.04 * t - 2 \quad (15)$$

Le calcul de la résilience globale correspondant au calcul de l'intégrale de la résilience locale, est donné par l'équation 16 :

$$\text{résilience globale} = \int_{t_0}^{t_r} \text{résilience locale} = \int_{t_p}^{t_r} S'(t) dt = [S(t)]_{t_p}^{t_r} = [S(t_r) - S(t_p)] \quad (16)$$

Nous résumons dans le Tableau 9 les calculs de la résilience locale et globale pour quelques intervalles de temps spécifiques. On retient les instants  $t_p(s)=5,3$ ,  $t_{max}(s)=50$  et  $t_r(s)=94,7$ . On choisit les deux instants  $t_i(s)=18,4$  et  $t_j(s)=81,6$ . L'instant initial  $t_0(s)=0$  et le temps de calcul final  $t_f(s)=100$ .

**Tableau 9. Evolutions temporelles de la résilience locale et globale**

Temps (s)	$t_0$	$t_p$	$t_i$	$t_{max}$	$t_j$	$t_r$	$t_f$
Résilience locale	-2	-1.8	-1.2	0	1.2	1.8	2
Résilience globale	0	-10	-30	-50	-29.7	-9.7	0

L'intervalle de temps compris entre  $\Delta t = [0 \ t_{max}]$  correspond à l'occurrence des perturbations, la courbe du critère est alors strictement décroissante. Dans cet intervalle, les perturbations induisent des pertes en termes de niveau de résilience du SHM. Le calcul donne ainsi des valeurs de résilience locale négatives. La résilience globale qui est la sommation des valeurs de résilience locale, est également négative, illustrant la perte de niveau global en termes de résilience du SHM. Cette résilience globale atteint son niveau minimal à  $t = t_{max}$ . L'instant  $t = t_{max}$  correspond également au début de récupération effective des perturbations ; la résilience locale devient positive, d'abord nulle, elle atteint son niveau maximal à la fin du temps de calcul  $t = t_f$ . Plus la valeur de la résilience locale est positive et importante, mieux le SHM réagit afin de récupérer la situation et limiter les effets de la (ou des) perturbation(s) survenue(s). La résilience globale reflète le niveau général du SHM *i.e.*, un gain croissant en termes de niveau de résilience ; la résilience globale croît et atteint son niveau maximal à  $t = t_f$ .

A partir du Tableau 9, on retient que la résilience du système diminue progressivement entre  $\Delta t = [0 \ t_{max}]$ .  $t = t_{max}$ , le système commence à récupérer des perturbations. Le niveau de résilience du système augmente alors graduellement jusqu'à son maximum à  $t = t_f$ .

La valeur de la résilience locale dépend de l'évolution de la courbe du critère défini. On peut donc avoir au cours du temps des valeurs identiques de résilience locale en particulier, en cas d'occurrence de multiples perturbations imprévues (perte puis récupération éventuelle) d'où le besoin de définir une résilience globale (Tableau 9). La résilience globale permet d'avoir par sommation successive de la résilience locale, donc l'évolution générale du niveau de résilience du SHM.

La résilience globale dépend du niveau de contrôle des perturbations, relative donc à la capacité des opérateurs à réagir et récupérer par maîtrise des évènements imprévus. La résilience locale peut être exprimée en pourcentage de niveau de perturbations en une seconde (une minute ou une heure) ; et la résilience globale, en pourcentage. La valeur initiale est 0; la valeur varie ensuite en fonction des sommations successives de la résilience locale pour atteindre une valeur finale.

### **3.3 Construction d'un vecteur d'indicateurs de la résilience**

A partir des équations 1 & 2, la résilience locale et globale relative à un critère donné a été définie (équations 4 et 5). En fonction de la nature du Système Homme-Machine, divers critères de performance peuvent être défini relativement aux facteurs affectant d'une part les contributions des opérateurs humains et du système technique à la résilience, et d'autre part, l'apport de l'interaction homme-machine en termes de résilience. Les critères à définir correspondent à des comportements ou des actions particulières des opérateurs/machine ou leurs effets sur le SHM ; mais également à l'occurrence ou aux conséquences de perturbations externes : la charge de travail humaine, le nombre d'erreurs humaines, la qualité de service [Vanderhaegen, 1999b; Vanderhaegen, 2009 ; Ouedraogo *et al.*, 2013 ; Polet *et al.*, 2009 ; Grabot et Letouzey, 2000], etc. Il est alors possible d'évaluer l'état SHM (en situation critique) en termes de résilience multicritères; *e.g.*, pour un instant  $t_i$  donné, on définit un vecteur  $V(t_i)$  incluant la résilience locale et globale sur la sécurité, la résilience

locale et globale sur la charge de travail, la résilience locale et globale sur la qualité de service, etc.

Pour un SHM donné, on évalue alors à chaque instant  $t_i$ , l'état du système (face aux situations critiques) en termes de résilience sous la forme d'un vecteur d'indicateurs de résilience relatif aux différents critères représentatifs de l'état du système préalablement défini. La résilience du SHM à un instant  $t_i$ ,  $V(t_i)$  est donnée par l'équation 17 :

$$V(t_i) = \left\{ \begin{array}{l} \text{résilience\_locale\_charge\_de\_travail}(t_i), \text{résilience\_globale\_charge\_de\_travail}(t_i), \\ \text{résilience\_locale\_qualité\_de\_service}(t_i), \text{résilience\_globale\_qualité\_de\_service}(t_i), \\ \dots, \\ \text{résilience\_locale\_sécurité}(t_i), \text{résilience\_globale\_sécurité}(t_i) \end{array} \right\} \quad (17)$$

Ainsi, nous pouvons évaluer la résilience d'un SHM ( $R_{SHM}$ ) au cours d'un scénario de durée égale ( $t_n$ ) sous la forme d'une matrice de vecteurs d'indicateurs (équation 18) avec, à chaque instant  $t_i$ , le vecteur  $V(t_i)$  de l'équation 17, comme la résilience multicritère instantanée du SHM.

$$R_{SHM} = \begin{pmatrix} V(t_1) \\ V(t_2) \\ \dots \\ V(t_i) \\ \dots \\ V(t_n) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \text{résilience\_locale\_charge\_de\_travail}(t_1), \dots, \text{résilience\_globale\_sécurité}(t_1) \\ \text{résilience\_locale\_charge\_de\_travail}(t_2), \dots, \text{résilience\_globale\_sécurité}(t_2) \\ \dots \\ \text{résilience\_locale\_charge\_de\_travail}(t_i), \dots, \text{résilience\_globale\_sécurité}(t_i) \\ \dots \\ \text{résilience\_locale\_charge\_de\_travail}(t_n), \dots, \text{résilience\_globale\_sécurité}(t_n) \end{pmatrix} \quad (18)$$

La méthode de calcul de la résilience locale et globale proposée, permet d'interpréter sous forme d'indicateurs de résilience, les critères affectant le plus l'état du SHM (en situation critique). Dans la définition de ces critères, on prend en compte la contribution des opérateurs et de la composante technique mais également le résultat de leur interaction. Ces indicateurs de résilience peuvent donc être mis en œuvre en définissant quelques critères :

- pour évaluer l'état d'un collectif d'opérateurs (ou un opérateur individuel) associé à la machine en termes de résilience multicritère;
- pour évaluer l'état d'un SHM dont on dispose du modèle (fonction de transfert, équations d'état, etc.) ou non, en termes de résilience multicritère.

Notre étude porte sur le contexte spécifique d'un SHM faisant face à une situation critique consécutive à l'occurrence d'un évènement sans précédent. La méthode proposée permettra de mesurer la résilience du système. Néanmoins, vue la spécificité du contexte, on pourrait envisager des méthodes ou des outils pour comprendre la situation en cours du SHM et éventuellement apprendre de celle-ci dans le but de mieux réagir la prochaine fois. Dans la section suivante, nous abordons au travers de nos propositions, la faisabilité :

- d'exploitation des indicateurs de résilience pour caractériser la situation en temps réel du SHM par la mesure de son niveau de résilience;
- d'intégration des indicateurs dans des processus d'apprentissage pour apprendre de la situation en cours

## 4 Intégration des indicateurs de résilience dans des processus d'apprentissage

Dans le chapitre 1, nous avons montré que l'organisation d'un système résilient est caractérisée par les propriétés d'anticipation, de réaction et de récupération. L'anticipation vise l'évitement d'un événement imprévu, ce qui n'est pas toujours possible en particulier face à des événements sans précédent. Néanmoins la proactivité de l'organisation résiliente du système contribue à la réactivité du système face à un événement imprévu, et à la prise des décisions pour récupérer de la situation avant que celle-ci ne dégénère. Face à l'occurrence de l'évènement imprévu, le système a besoin d'évaluer la situation afin de se réorganiser pour s'adapter au mieux. De plus, la réaction et la récupération peuvent être mises en œuvre au travers de processus d'apprentissage face à l'imprévu [Vanderhaegen *et al.*, 2009].

Dans la section précédente, un couple d'indicateurs de résilience (la résilience locale et la résilience globale) a été défini. L'état d'un SHM peut être alors mesuré. En effet, sur la base d'un certain nombre de critères, nous déterminons par calcul un vecteur instantané d'indicateurs multicritères de la résilience (équation 17).

Dans la présente section, nous abordons le besoin d'outil d'estimation permettant de d'évaluer une situation critique dans laquelle se trouverait le SHM (état du SHM en termes de résilience) et par la suite, d'apprendre de cette situation; le but étant d'aider à la réaction et à la récupération du système face à des événements sans précédent. Pour ce faire, nous détaillons l'exploitation des indicateurs de résilience dans des processus d'apprentissage. Il s'agit d'aboutir à un apprentissage renforcé appliqué à l'évaluation de la résilience d'un SHM face à des situations critiques. Trois contributions sont alors proposées :

**Contribution n°1 :** évaluation de la situation (état du SHM) par l'estimation d'indicateurs de résilience sur les critères qui ne peuvent être mesurés « en ligne ».

On associe à notre estimateur, **un algorithme d'apprentissage par renforcement des paramètres d'estimation.**

Pour un critère défini, on évalue le couple (résilience locale, résilience globale) associé. Certains critères sont directement mesurables "en ligne". Si l'on considère par exemple, le vecteur d'indicateurs de résilience de l'équation 17 (domaine ferroviaire), le critère "charge de travail" est mesurable en temps réel puisqu'il correspond aux nombres d'interactions hommes-machines. Il en est de même pour le critère "qualité de service" qui est relatif au respect des horaires de départ et d'arrivée en gare. Par contre, le critère "sécurité" ne peut être mesuré en temps réel. Il s'agira alors d'estimer par *e.g.*, le couple (résilience locale, résilience globale) associée à ce critère pour compléter le vecteur d'état  $V(t)$  du SHM à l'instant  $t_i$ . Ce vecteur illustre l'état du SHM en termes de résilience et permet donc la compréhension de la situation par l'estimation de la "gravité" de celle-ci à un instant donné.

Nous associons à cet estimateur une fonction de renforcement itératif pour fiabiliser l'estimation de la séquence manquante du vecteur d'indicateurs de la résilience. Ce renforcement est géré en prenant en compte l'erreur d'estimation des situations passées, interprétées à partir d'indicateurs de résilience.

**Contribution n°2 :** capitalisation de la connaissance face à une situation critique en apprenant et en conservant la connaissance associée dans une base de connaissances.

On associe à notre estimateur, **un algorithme d'apprentissage par renforcement de la base de connaissances.**

Les vecteurs instantanés d'indicateurs de résilience  $V(t_i)$  des situations passées sont capitalisés au fur et à mesure, en termes de connaissances face à une situation critique, dans la base de connaissances. La capitalisation des connaissances constitue ainsi un processus d'apprentissage itératif renforcé, permettant de fiabiliser l'outil d'estimation.

**Contribution n°3 :** évaluation de la situation, capitalisation de la connaissance face à cette situation critique par apprentissage de celle-ci. Nous associons ainsi les deux contributions précédentes.

On associe à notre estimateur, **un algorithme d'apprentissage par double renforcement** : un renforcement des paramètres d'estimation et un renforcement de la base de connaissances.

Les trois algorithmes d'apprentissage renforcé proposés seront appliqués dans le cadre de l'étude d'un SHM. Or, nous ne disposons pas de modèle de SHM notamment un modèle fonctionnel de l'opérateur humain. Pour la mise en œuvre de notre outil d'estimation, nous nous baserons sur les réseaux de neurones en termes de "boite noire" capable d'apprendre et moins exigeant en termes de connaissance initiale (données dans la base d'apprentissage). Plusieurs types de réseaux de neurones existent. Nous nous baserons sur le réseau de Kohonen, réseau de neurones non supervisés largement éprouvé au sein de l'équipe Système Homme-Machine de notre laboratoire.

Le réseau de Kohonen, ou carte auto adaptative, est composé d'une série de neurones interconnectés et agissant de manière à résoudre une tâche donnée. Nous rappelons une illustration de la carte de Kohonen sur la Figure 26. Chaque neurone, à l'instar du neurone ou unité (K) du réseau, est représenté par un vecteur poids synaptique correspondant à un vecteur d'indicateurs de résilience  $V(t_i)$  placé en entrée du réseau. Chaque état du SHM en termes de mesures de résilience peut être conservé dans la carte de Kohonen sous forme de connaissance associée à chaque neurone du réseau.

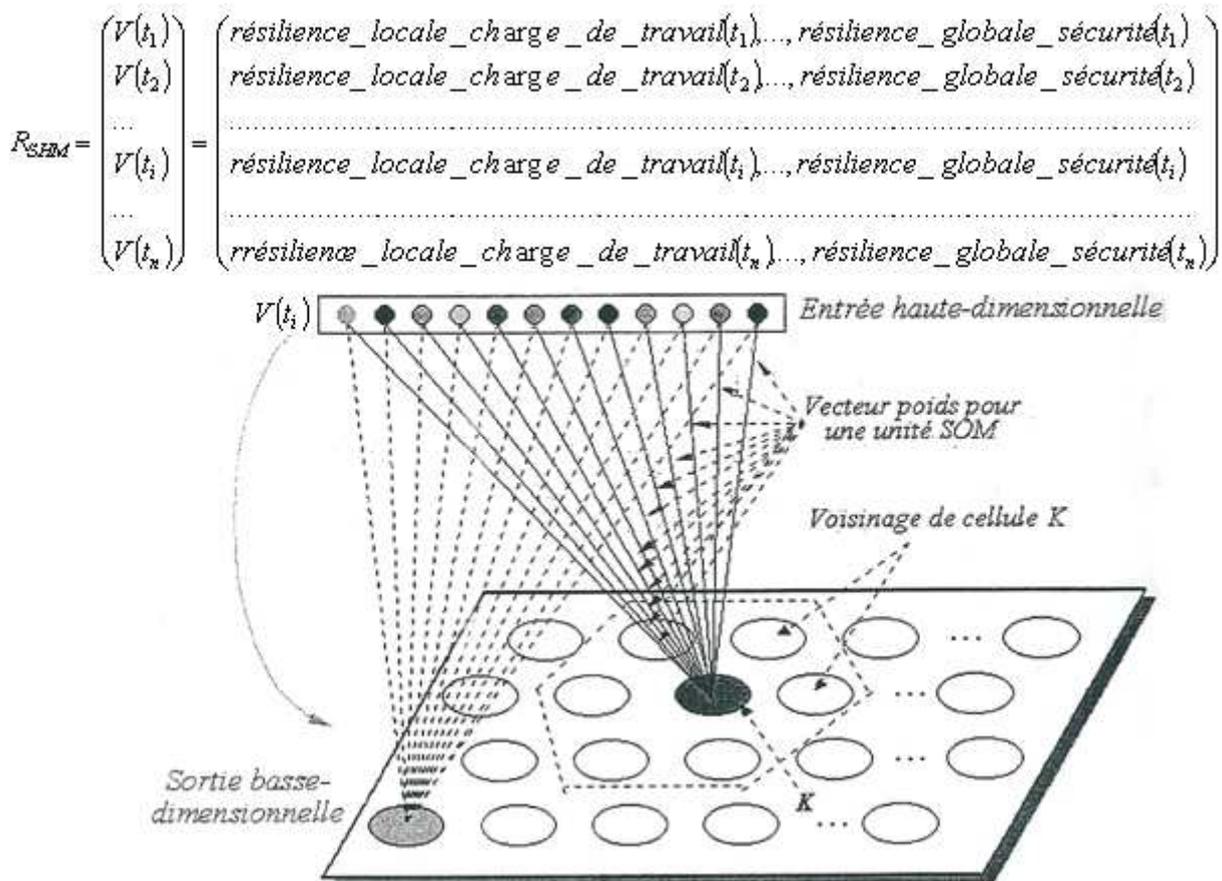


Figure 26. Illustration de la carte de Kohonen (adaptée de [Zhang, 2004])

De plus, la mise en œuvre effective du réseau de Kohonen nécessite deux étapes :

- la phase d'apprentissage initial : à partir d'une base de données "experte", le réseau de neurones est optimisé par des méthodes d'apprentissage ; il s'agit de modifier les poids synaptiques des neurones en fonction d'un jeu de données présenté en entrée du réseau. Le but de cet entraînement est de permettre au réseau de neurones "d'apprendre" à partir des exemples.
- suivi de la phase d'exécution (classification, prédiction, estimation, etc.) : après la phase d'apprentissage initial dite "d'entraînement", le réseau est alors capable de réaliser des opérations d'estimation, de prédiction ou de classification sur la base de nouvelles données présentées en entrée du réseau.

Ne pouvant disposer de données initiales "expertes" d'indicateurs de la résilience du SHM en situation critique pour la phase d'apprentissage initial du réseau de Kohonen, nous avons développé et mis en œuvre nos propres algorithmes d'apprentissage renforcé. On associe à notre estimateur par réseau de neurones, nos algorithmes d'apprentissage itératif renforcé pour fiabiliser l'estimation au fur et à mesure des itérations.

Dans un premier temps, nous présentons le principe d'estimation ou de prédiction par réseau de Kohonen. Puis nous présenterons la structure d'estimation adoptée pour notre outil et nous détaillerons sa mise en œuvre. En effet, nous utilisons une carte ou réseau de Kohonen que nous adapterons au travers la mise en œuvre de nos propres algorithmes d'apprentissage renforcé.

#### **4.1 Algorithme de Kohonen**

Les étapes de la prédiction (ou de l'estimation) des données par l'intermédiaire du réseau de Kohonen comprennent la phase d'apprentissage du réseau de neurones sur un ensemble de données dit base d'apprentissage dans le but d'optimiser les connexions synaptiques du réseau; puis la phase de prédiction (ou de classification) à l'aide du réseau de neurones calibré. Les étapes sont les suivantes :

1. Tout d'abord, déterminer la topologie de la carte et le nombre de neurones. Le nombre de neurones peut être déterminé par une formule heuristique de type  $5\sqrt{p}$  avec  $p$  la taille de l'ensemble des données [Zhang, 2004]. Puis initialiser aléatoirement les vecteurs poids avec notamment la valeur de chaque connexion *e.g.*, entre [-1 1];
2. La phase d'apprentissage du réseau de neurones consiste à :
  - i. Présenter au fur et à mesure les vecteurs de données ( $V(t_1)$  à  $V(t_n)$ ) issues de la base d'apprentissage à l'entrée du réseau ;
  - ii. Déterminer le neurone gagnant de position ( $K$ ) dont le vecteur poids associé est le plus similaire au vecteur de données d'entrée. La similarité est généralement mesurée par un calcul de distance minimale ( $D$ ) ;
  - iii. Apprentissage initial : il s'agit de mettre à jour le vecteur poids du neurone gagnant ainsi que ceux des autres neurones appartenant à son voisinage topologique. Puis, arrêt de l'apprentissage lorsqu'un nombre optimal d'itérations est fait : aller à l'étape 3, sinon aller au point i.
3. Estimation (ou prédiction) sur la base des vecteurs poids modifiés des neurones de la carte.

L'étape 1 est relative à la construction et à l'initialisation des neurones du réseau. Ces valeurs initiales des connexions synaptiques seront corrigées successivement lors de la phase d'apprentissage initial qui débute à l'étape 2. Cette dernière, subdivisée en 3 sous étapes, correspond à la phase proprement dite d'apprentissage du réseau de neurones avec un processus de recherche du neurone gagnant ou le plus similaire aux données présentées au réseau, suivi de la mise à jour des vecteurs poids du neurone gagnant et de ses voisins. Cet apprentissage se fait en présentant au fur et à mesure les données de la base d'apprentissage au réseau de neurones qui s'adapte en corrigeant les poids de ses connexions. L'étape 3 correspond à la prédiction (l'estimation, la classification, etc.). Nous détaillons dans les points suivants ces différentes étapes.

#### - La recherche du neurone gagnant

La recherche du neurone gagnant ou le plus similaire au vecteur de données d'entrée se fait par l'intermédiaire d'un calcul de distance minimale entre les deux vecteurs. Il existe plusieurs fonctions de calcul de la distance telles que la distance de Manhattan, la distance de Minkowski, la distance de Tchebychev. La distance minimale est généralement donnée par la distance euclidienne, elle donne la distance minimale la plus intuitive. La distance euclidienne entre les deux vecteurs (le vecteur d'entrée  $V(t_i)$  et un vecteur poids  $W_k$  du réseau) est défini suivant l'équation 19 :

$$d(V(t_i), W_k) = \sqrt{\sum_{j=1}^m (V(t_i)^j - W_k^j)^2} \quad (19)$$

Avec  $m$  : le nombre d'éléments inclus dans les deux vecteurs  $V(t_i)$  et  $W_k$ .

Le neurone de position ( $k$ ) et ayant pour poids synaptique ( $W_k$ ) est le neurone gagnant si la distance euclidienne associée  $d(V(t_i), W_k)$  est la distance minimale.

#### - La mise à jour du neurone gagnant et de ses voisins

Lors de l'initialisation, un poids a été aléatoirement affecté à chaque connexion synaptique des neurones dans le réseau. La mise à jour de ces poids représente la clé du mécanisme d'apprentissage par le réseau de neurones. On procède au renforcement du vecteur poids  $W$  du neurone gagnant afin de réduire l'erreur de similarité. Cette mise à jour consiste en une correction des poids en fonction des itérations et de la différence absolue entre le vecteur d'entrée et le vecteur poids du neurone correspond, suivant la règle (équation 20) :

$$W_j^{t+1} \leftarrow W_j^t + \eta \phi(V_j - W_j^t) \quad (20)$$

Avec  $t$  : le temps;

$\eta$  : le taux d'apprentissage ;

$\phi$  : la fonction de voisinage.

Le vecteur poids  $W_k$  du neurone gagnant est mis à jour suivant l'équation 9. Le taux d'apprentissage  $\eta$  indique l'amplitude de la mise à jour. Le taux d'apprentissage initial a une valeur proche de 1 pour induire une convergence rapide des vecteurs poids, puis diminue au cours des itérations, par exemple selon l'équation 21 :

$$\eta = \eta_0 * (1 - it / T) \quad (21)$$

Où  $it$  : est l'itération courante et  $T$  le nombre total d'itérations

$\eta_0$  : le taux d'apprentissage initial.

Un taux d'apprentissage faible (respectivement fort) induit des ajustements faibles (respectivement forts). La fonction de voisinage  $\phi(j,k)$  de part sa valeur définit un rayon dans lequel les neurones présents sont considérés comme voisins du neurone gagnant  $k$  (Figure 26). Leurs vecteurs poids associés sont également mis à jour. La fonction de voisinage décrit également comment les neurones dans la proximité du vainqueur (position  $K$ ) sont corrigés. Les deux fonctions de voisinage les plus utilisées sont les fonctions de type gaussien et les fonctions à seuils.

Dans la fonction de type gaussien le réajustement est proportionnel à la distance séparant les neurones. Cette fonction est illustrée sur la Figure 27 et a pour formule l'équation 22 suivante :

$$\phi(j, k) = \exp\left(-\frac{\|w_j - w_k\|^2}{2\sigma^2(t)}\right) \quad (22)$$

Où  $w_k$  : est le neurone gagnant

$\sigma$  : Coefficient de voisinage décroissant en fonction des itérations. Son rôle étant de déterminer le rayon de voisinage autour du neurone gagnant.

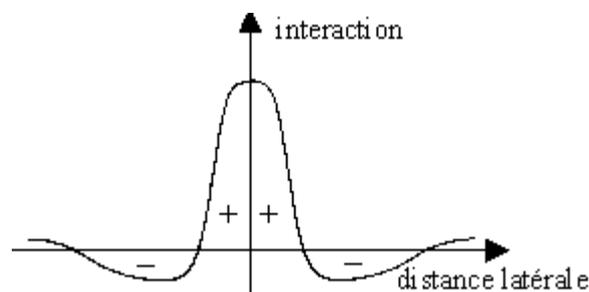


Figure 27. Fonction de voisinage de type gaussien.

Dans les fonctions à seuil, les neurones du voisinage ont la même influence, en dehors ils n'en ont aucune. Cette fonction est décrite par l'équation 23 :

$$\phi(j, k) = \begin{cases} 1 & \text{si } \|w_j - w_k\| < \sigma(t) \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (23)$$

La phase d'apprentissage du réseau de neurones se fait en plusieurs itérations avec au début, un grand rayon de voisinage initial et un taux d'apprentissage initial important que l'on réduit au travers des itérations avec :  $0 \leq \eta \leq 1$

L'apprentissage se termine lorsque toutes les données de la base d'apprentissage ont été présentées à l'entrée du réseau. Cette phase « d'entraînement », permet d'avoir une configuration optimale du réseau de façon à ce que l'erreur d'estimation (ou de prédiction, ou de classification) soit la plus faible.

#### - Estimation par réseau de Kohonen

Pour l'estimation « en ligne » par réseau de Kohonen, un vecteur incluant les données connues  $V(t_i)^{j=1, \dots, n}$  est présenté en entrée du réseau de neurones optimal. Le neurone gagnant est déterminé ; les données du vecteur poids de ce neurone gagnant correspondant aux données non connues  $W_k^{j=n+1, \dots, m}$  constituent l'estimation.

## - Discussions

L'estimation (ou la prédiction) des indicateurs de résilience par réseau de Kohonen présente deux phases ; une phase d'apprentissage initial et la phase d'estimation. Au cours de la phase d'apprentissage, le réseau de neurones intègre les vecteurs d'entrée. Les valeurs initiales des poids sont fixées arbitrairement mais sont mises à jour successivement afin de déterminer le modèle reproduisant le plus fidèlement possible le comportement des données d'entrée.

Le réseau de Kohonen nécessite un "entraînement" initial à partir des données "expertes" issues d'une base d'apprentissage. Or, notre étude concerne des SHM faisant face à des événements sans précédent. Nous ne disposons d'aucunes données d'indicateurs de la résilience du SHM en situation critique. Nous ne pouvons donc pas appliquer l'algorithme de Kohonen notamment l'apprentissage initial pour optimiser notre réseau de neurones. Par conséquent, nous préconisons de mettre en œuvre une structure d'estimation de la résilience par apprentissage renforcé.

### 4.2 Structure d'estimation par apprentissage renforcé

Notre structure d'estimation de la résilience est inspirée des structures de contrôle itératif de l'apprentissage comme les commandes combinées feedforward-feedback présentées dans la section 4 du chapitre 2. En effet, différentes études récentes du contrôle de l'apprentissage itératif (Iterative Learning Control) se sont intéressées au principe du Contrôle Itératif de l'Apprentissage [Ouedraogo *et al.*, 2011 ; Vanderhaegen *et al.*, 2009 ; Polet *et al.*, 2012]. Ce type de contrôle permet aux systèmes d'améliorer leur performance à travers un simple processus d'apprentissage. Le processus dans lequel les erreurs sont détectées et minimisées commence avec un faible niveau de connaissance. L'algorithme du contrôle de l'apprentissage itératif ajuste ou renforce ses paramètres après un certain nombre d'itérations dans le but de réduire l'erreur entre le signal d'entrée et le signal de sortie. Le renforcement est alors une fonction importante de contrôle de l'apprentissage itératif [Bucak et Zohdy, 2001; Wang et Usher, 2005; Duan et al, 2007]. Il consiste à gérer l'erreur positive ou négative de l'apprentissage afin d'atteindre les objectifs prédéfinis.

Pour ce faire, nous adoptons la structure de la Figure 28, c'est un estimateur à partir d'un réseau de Kohonen. Notre système utilise une structure d'estimation séquentielle itérative et renforcée [Ouedraogo *et al.*, 2013] :

- **Itérative** : estimation des indicateurs de résilience qui ne peuvent être mesurés en « en ligne »;
- **Séquentielle** : estimation de séquences chronologiques d'indicateurs de résilience;
- **Renforcée** : renforcement de la base de connaissances (réseau) et/ou des paramètres d'estimation en fonction de l'erreur à minimiser.

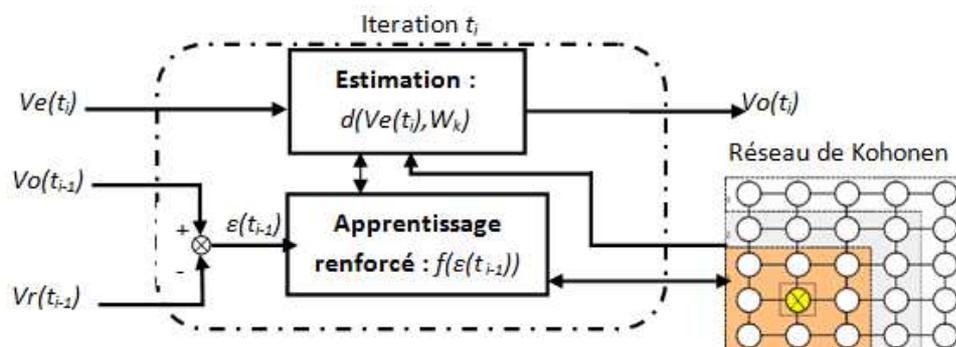


Figure 28. Structure d'estimation séquentielle itérative et renforcée

Cette structure nous permettra de mettre en œuvre nos trois algorithmes d'apprentissage renforcé. A l'itération  $t_i$ , l'estimation  $Vo(t_i)$  se fait à partir du réseau par la recherche du neurone gagnant avec un calcul de la distance minimale  $\min[d(V(t_i), W_k)]$  entre le vecteur d'entrée  $Ve(t_i)$  et le vecteur poids ( $W_k$ ) de chacun des neurones du réseau. Pour fiabiliser l'estimation de la séquence manquante du vecteur d'indicateurs de la résilience, nous mettons en œuvre nos algorithmes d'apprentissage renforcé. Nous associons à cette estimation une fonction de renforcement par l'erreur issue de l'itération précédente  $\varepsilon(t_{i-1})$ . L'erreur est calculée par la différence entre le vecteur d'indicateurs de résilience réel  $Vr(t_{i-1})$  et le vecteur estimé  $Vo(t_{i-1})$  à l'itération précédente. La structure proposée est similaire à la structure de contrôle combinée feedforward-feedback détaillée dans le chapitre 2. Le processus d'estimation peut être identifié comme un contrôle feedforward ; et le processus d'apprentissage est similaire au contrôle feedback ou retour d'information. En effet, l'apprentissage renforcé permet un renforcement itératif des paramètres d'estimation et/ou de la connaissance associée au réseau de neurones. Ce renforcement est géré en prenant en compte l'erreur d'estimation des situations passées, interprétées à partir d'indicateurs de résilience.

Puisqu'on ne dispose pas de données « expertes » en termes d'indicateurs de la résilience du SHM en situation critique, nos algorithmes permettent une estimation par apprentissage renforcé. Les processus d'estimation associés au processus d'apprentissage renforcé s'effectuent de manière itérative, ce qui diffère de l'algorithme de Kohonen où un apprentissage initial complet est d'abord effectué. Le réseau est ensuite utilisé pour effectuer les différentes estimations.

#### - **Le prétraitement des données**

En fonction des instants spécifiques choisis pour le calcul des indicateurs de résilience locale et globale, les valeurs des données peuvent couvrir un large spectre de valeurs. Par souci de simplification notamment du nombre de neurones du réseau à fixer pour l'initialisation aléatoire des poids synaptiques, nous procédons à une normalisation des valeurs des indicateurs de la résilience. Les vecteurs poids des connexions neuronales sont initialisés aléatoirement à des valeurs comprises entre  $[-1 \ 1]$ . Les données d'entrée (en l'occurrence les valeurs d'indicateurs de résilience) seront également normalisées entre -1 et 1. On procède donc à une standardisation « min-max » des valeurs de chaque élément ( $X_j$ ) des vecteurs d'indicateurs en appliquant l'équation 24 :

$$X'_j = \frac{X_j - \min(X \in V_{ii})}{\max(X \in V_{ii}) - \min(X \in V_{ii})} - \frac{\max(X \in V_{ii}) - X_j}{\max(X \in V_{ii}) - \min(X \in V_{ii})} \quad \forall \quad j = 1, \dots, 2m \quad (24)$$

Avec  $m$  : le nombre de critères prédéfini;

$(X_j)$  : valeur de la donnée à normalisée.

$(X'_j)$  : valeur normalisée de la donnée.

En reprenant notre exemple de la Figure 25, le prétraitement par application de l'équation précédente, nous donne l'évolution temporelle de la résilience locale et globale. Nous résumons dans le Tableau 10, les valeurs normalisées de la résilience locale et globale pour quelques intervalles de temps spécifiques.

**Tableau 10. Evolutions temporelles des valeurs normalisées la résilience locale et globale**

Temps (s)	$t_0$	$t_p$	$t_i$	$t_{max}$	$t_j$	$t_r$	$t_f$
Résilience locale	-1	-0.9	-0.6	0	0.6	0.9	1
Résilience globale	1	0.6	-0.2	-1	-0.19	0.61	1

Après estimation, Pour retrouver les valeurs non normalisées de la résilience locale et globale, on refait l'opération inverse en appliquant l'équation suivante :

$$X_j = \frac{1}{2} \max(X \in V_{ii}) * (X'_j + 1) + \frac{1}{2} \min(X \in V_{ii}) * (1 - X'_j) \quad \forall j = 1, \dots, 2m \quad (25)$$

Les indicateurs de résilience sont intégrés dans un processus d'apprentissage par renforcement de la fonction d'estimation d'une part, et d'autre, par renforcement de la base de connaissance. Ces indicateurs constituent les entrées/sorties de notre structure d'estimation. Nous détaillons dans la suite, la mise en œuvre de nos trois propositions.

### 4.3 Renforcement des paramètres de la fonction d'estimation

Ce renforcement consiste à intégrer l'erreur d'estimation de l'itération précédente dans l'estimation en cours. La Figure 29 présente l'algorithme du renforcement des paramètres de la fonction d'estimation. Pour une itération  $t_i$  donnée, les différentes étapes du renforcement des paramètres de la fonction d'estimation suivent le principe de fonctionnement de notre structure et sont identifiées comme suit :

#### - Trouver le neurone gagnant

On présente au réseau le vecteur d'entrée  $Ve(t_i)$  contenant les  $n$  valeurs d'indicateurs de résilience pouvant être mesurées en temps réel ; les éléments  $(n+1, \dots, m)$  devant alors être estimés (avec  $m > n$ ). Le nombre de neurones est donné par  $\text{card}(W)$ . A partir du neurone n°1 ( $N(t_i)$ ), on parcourt tous les neurones la carte à la recherche du neurone gagnant ; en l'occurrence, il s'agit du neurone le plus similaire en termes de distance euclidienne minimale.

$$\text{Si } d_{\min} = ||Ve(t_i)^T - W_{\text{neurone}[k]}(1, 2, \dots, n)^T|| \quad (26)$$

Alors le neurone  $W_{\text{neurone}[k]}$  est le gagnant. Puisque l'estimation ne concerne que les éléments  $(n+1, \dots, m)$  non mesurables "en ligne" du vecteur d'entrée, on ne retient que les éléments correspondants du neurone gagnant  $P(t_i)$ .

#### - Calcul d'erreur

C'est le calcul de l'erreur issue de l'itération  $i-1$  précédente. On compare ainsi les données réelles (qui manquaient dans le vecteur d'entrée précédent) à celles qui ont été estimées :  $\varepsilon(t_{i-1})^T \leftarrow V^{\text{Réel}}(t_{i-1})(n+1, \dots, m)^T - V^{\text{Estimé}}(t_{i-1})(n+1, \dots, m)^T$  (27)

Pour la première itération, l'erreur de renforcement  $\varepsilon(t_1)$  est initialisée à zéro.

#### - Estimation par apprentissage renforcé

L'estimation renforcée correspond ici, aux éléments  $P_{[i]}$  du neurone gagnant que l'on renforce par une fonction de l'erreur dont le calcul est présenté dans l'étape précédente :

$$V^{\text{Estimé}}(t_i)(n+1, \dots, m)^T \leftarrow P(t_i)^T + f(\varepsilon(t_{i-1}))^T \quad (28)$$

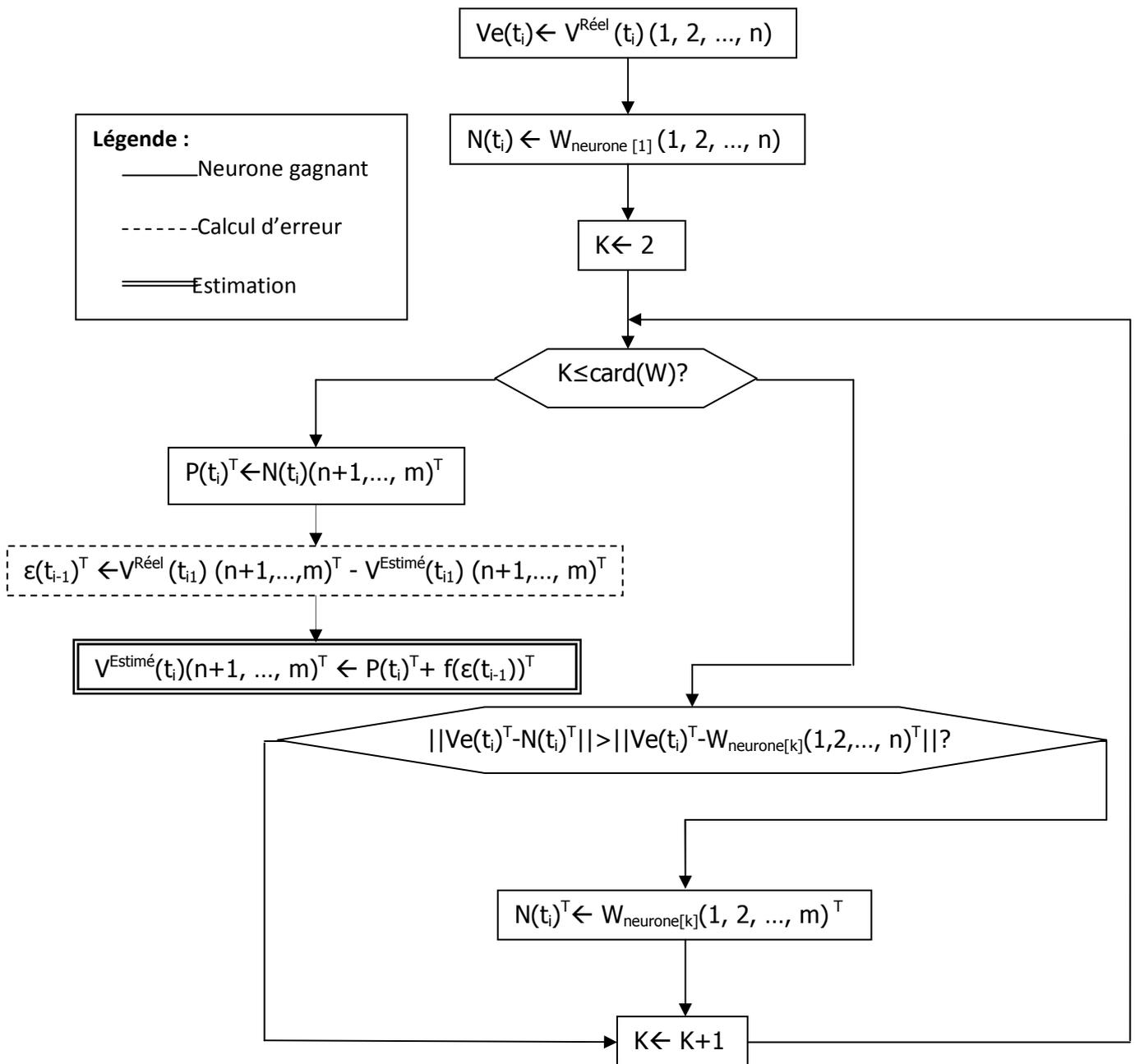


Figure 29. Algorithme du renforcement de la fonction d'estimation

Dans cet algorithme du renforcement de la fonction d'estimation, seule la phase de recherche du neurone gagnant est similaire à celle de l'algorithme de Kohonen (Cf. section 4.1). Il n'y a pas de phase initiale d'apprentissage comme dans l'algorithme de Kohonen mais une estimation directe par apprentissage renforcé et itératif.

#### 4.4 Renforcement de la base de connaissance

Ce renforcement est itératif et consiste en une capitalisation de connaissances en termes d'indicateurs de résilience dans le réseau. Il s'agit de mettre à jour itérativement les vecteurs poids synaptiques des neurones du réseau sur la base d'un calcul d'erreur d'estimation. Cette phase de modification des connexions neuronales est similaire à la phase de mise à jour du neurone gagnant et de ses voisins topologiques dans l'algorithme de Kohonen. Dans notre structure, le renforcement est itératif alors que dans l'algorithme de Kohonen, la modification des connexions est faite dans la phase d'apprentissage.

La Figure 30 présente l'algorithme du renforcement de la base de connaissances. Pour une itération  $t_i$  donnée, les différentes étapes du renforcement de la base de connaissance (réseau de neurones) suivent le principe de fonctionnement de notre structure et sont identifiées comme suit :

- **Trouver le neurone gagnant**

Cette étape est identique à la recherche du neurone gagnant dans le cas du renforcement des paramètres de la fonction d'estimation décrit précédemment. La seule différence est qu'on a besoin en plus, de la position exacte ( $Pos=K$ ) du neurone gagnant puisque ce dernier et ses voisins seront par la suite renforcés.

- **Calcul de l'erreur**

C'est également un calcul de l'erreur issue de l'itération  $i-1$  précédente. Sauf que cette fois, on compare tous les éléments du vecteur de données réelles  $V^{Réel}(t_{i-1})(1, \dots, m)^T$  de l'itération précédente à ceux du vecteur estimé précédemment.

$$B(t_{i-1})^T \leftarrow V^{Réel}(t_{i-1})(1, \dots, m)^T - V^{Estimé}(t_{i-1})(1, \dots, m)^T \quad (29)$$

Pour la première itération, l'erreur de renforcement  $\beta(t_1)$  est initialisée à zéro.

- **Estimation par connaissance renforcée**

Dans le cas du renforcement de la base de connaissance, on modifie les vecteurs poids des neurones du réseau. L'estimation correspond aux éléments  $P(t_i)$  du neurone gagnant :  $V^{Estimé}(t_{i-1})(n+1, \dots, m) \leftarrow P(t_{i-1})$ .

Le neurone  $W_{neurone [k]}$  gagnant est renforcé par une fonction de l'erreur calculée dans l'étape précédente :

$$W_{neurone [Pos=k]} = W_{neurone [Pos=k]} + f(\beta(t_{i-1})) \quad (30)$$

On définit une fonction dite de voisinage  $\emptyset(j,k)$  dont le paramètre ( $\sigma$ ) définit un rayon dans lequel les neurones présents sont considérés comme voisins du neurones ( $W_{neurone[k]}$ ) gagnant (équations 12 et 13). Leurs vecteurs poids associés à ses neurones voisins sont également renforcé (équation 31) suivant une fonction d'erreur sur le neurone voisin considéré (équations 32) :

$$\text{Si le neurone } W_j \text{ est voisin du gagnant } W_k, \text{ alors } W_{neurone [Pos=j]} = W_{neurone [Pos=j]} + f(\mu_j) \quad (31)$$

$$\text{Avec } \mu_j^T \leftarrow V^{Réel}(t_{i-1})(1, \dots, m)^T - W_{neurone [Pos=j]}(1, \dots, m)^T \quad (32)$$

Par identification avec la règle de mise en jours des vecteurs du réseau de Kohonen, on a :

$$f(\mu_j) = \eta \times \phi \times (\mu_j) \quad \text{et} \quad f(\beta_{i-1}) = \eta \times \phi \times (\beta_{i-1}) \quad (33)$$

Avec  $\eta$  : le taux d'apprentissage et  $\emptyset$  : la fonction de voisinage.

#### 4.5 Double renforcement

Le double renforcement est l'association des deux propositions de renforcements précédents. Il consiste donc d'une part, à intégrer l'erreur d'estimation de l'itération précédente dans l'estimation en cours, et d'autre part, à capitaliser de la connaissance (en termes de mesures de résiliences) face aux situations critiques en apprenant et conservant la nouvelle donnée que l'on associe à la carte de neurones. La Figure 31 présente l'algorithme du double renforcement :

- renforcement des paramètres de la fonction d'estimation sur la base de l'erreur d'estimation de l'itération précédente, suivi du
- renforcement de la base de connaissance associée à la structure du réseau, sur la base de l'erreur sur la connaissance.

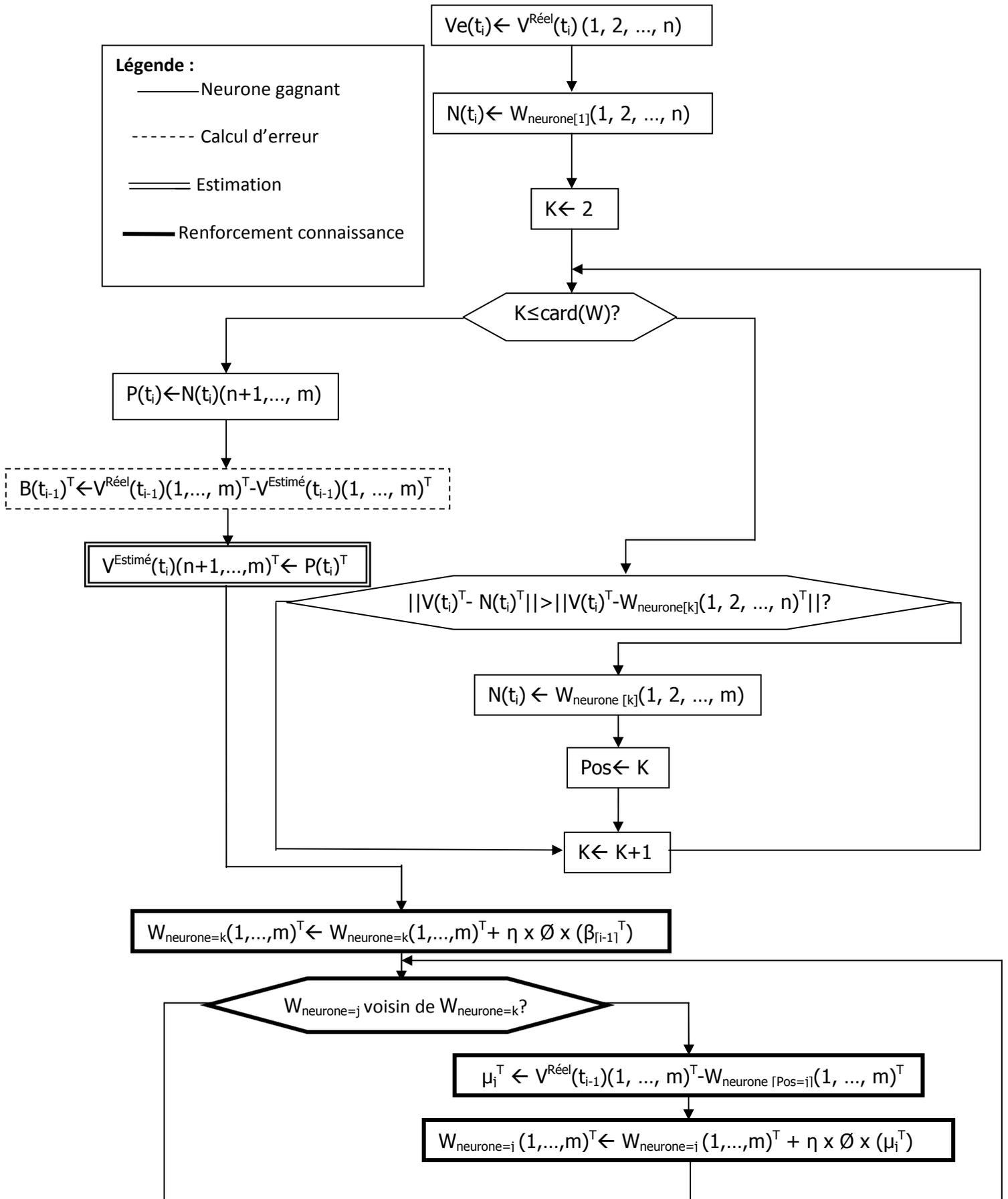


Figure 30. Algorithme du renforcement de la base de connaissances

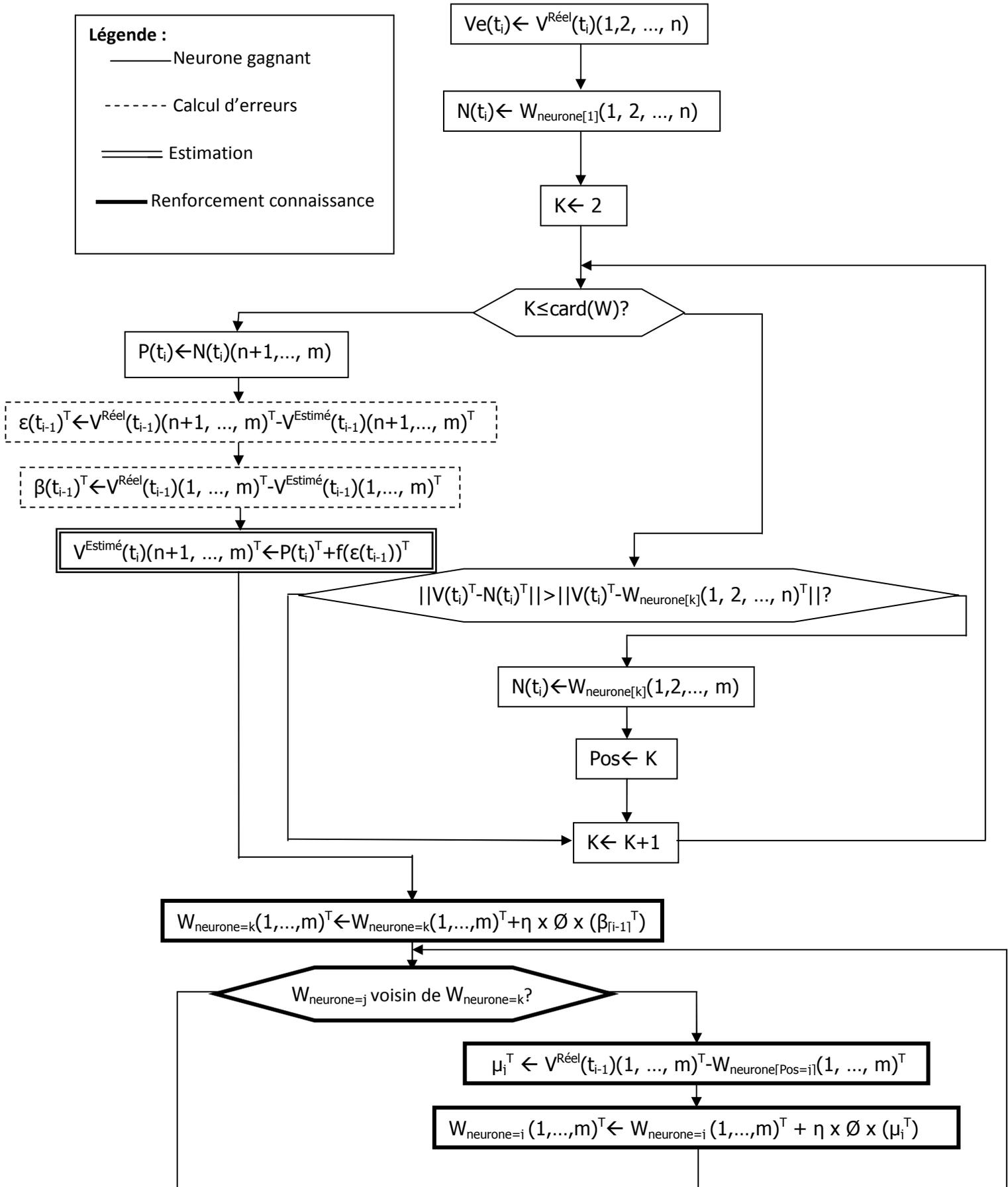


Figure 31. Algorithme du double renforcement

## 5 Conclusion

Dans ce troisième chapitre, nous avons positionné notre cadre d'étude dans le contexte d'un SHM faisant face à des situations critiques consécutives à l'occurrence d'évènements sans précédent. Nos contributions consistent à la proposition d'une méthode de d'évaluation de la résilience locale et globale puis à l'exploitation des indicateurs obtenus dans des processus d'apprentissage renforcé dans le but d'estimer les indicateurs non mesurables « en ligne ».

Nous avons présenté une méthode d'évaluation multicritères de la résilience d'un SHM face à une situation critique. Un exemple de mise en œuvre pratique est détaillé pour souligner l'intérêt de disposer d'un couple d'indicateurs de la résilience. Nous avons également abordé la construction d'une matrice de vecteurs d'indicateurs de résilience et son interprétation sous forme de base de connaissance.

Ainsi, le vecteur instantané  $V(t_i)$  permet d'illustrer l'état du SHM en termes de résilience et permet donc la compréhension de la situation par l'estimation de la "gravité" de celle-ci à un instant donné. Le besoin de comprendre et d'apprendre des situations critiques est également abordé notamment au travers de trois propositions :

- Le renforcement des paramètres d'estimation : pour appréhender l'état du SHM en termes d'indicateurs de résilience en temps réel, en estimant les indicateurs de résilience qui ne peuvent être mesurés directement « en ligne ». L'erreur d'estimation précédente est pris en compte pour renforcer et fiabiliser l'estimation en cours ;
- Le renforcement de la base de connaissances : au cours des itérations, on capitalise les indicateurs de résilience du SHM face aux situations critiques en termes de connaissance associée aux neurones de la carte réseau. Sur la base du principe d'apprentissage du réseau de Kohonen, les neurones de notre carte de connaissance est renforcé par l'intermédiaire d'une fonction d'erreur ;
- Le double renforcement : il s'agit de combiner les deux types de renforcement précédents.

Les algorithmes relatifs à ces propositions ont ensuite été détaillés.

Afin de tester d'une part, la méthode d'évaluation de la résilience des SHM et d'autre part les algorithmes d'évaluation des indicateurs de la résilience par apprentissage renforcé, il est nécessaire de l'appliquer sur des Systèmes Hommes-Machines dans lesquels les opérateurs humains sont confrontés à l'occurrence d'évènements sans précédent. Nous retenons à cet effet, le cadre de l'aviation militaire pour évaluer la pertinence des méthodes et outils proposés. Nous aborderons donc dans le quatrième chapitre, les détails de l'application de nos méthodes et le développement des processus d'apprentissage renforcé dans le cadre des travaux de cette thèse.



---

## **Chapitre 4. Analyse des résultats expérimentaux de l'apprentissage renforcé pour l'évaluation de la résilience**

---

Chapitre 4. Analyse des résultats expérimentaux de l'apprentissage renforcé pour l'évaluation de la résilience .....	85
1 Introduction.....	86
2 Présentation de la campagne expérimentale .....	87
3 Apprentissage renforcé pour l'évaluation de la résilience.....	91
3.1. Définition des critères.....	91
3.2. Analyse des résultats de l'estimation de la résilience .....	94
3.3. Evaluation a posteriori de la résilience.....	105
3.4. Liens entre la classification des équipages et les résultats de REACT .....	110
4 Conclusion .....	115

## 1 Introduction

Dans le chapitre précédent, une méthode d'évaluation multicritère de la résilience d'un Système Homme-Machine faisant face à des situations critiques a été formalisée. Nous avons ensuite abordé l'exploitation de ces indicateurs de résilience pour définir l'état du SHM dans le but de caractériser la situation "en ligne" ; puis l'intégration de ces indicateurs dans des processus d'apprentissage pour apprendre de la situation en cours.

Ce chapitre est divisé en deux parties. Dans la première partie, nous présentons le contexte de mise en œuvre de la campagne expérimentale pour l'évaluation de la résilience. Cette campagne expérimentale a été menée dans le cadre du projet de recherche exploratoire, le projet REI-REACT visant à proposer une démarche de réaction à différents équipages faisant face à des événements imprévus. Ce projet a été financé par la DGA (Direction Générale de l'Armement français) et a été réalisé en partenariat avec la société Dédale (Paris), l'Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis (UVHC), l'Université de Technologie de Troyes (UTT) et l'Université de Technologie de Compiègne (UTC). Nous décrivons en détails le protocole expérimental mené.

Dans la deuxième partie, nous abordons les résultats de la mise en œuvre de nos différentes propositions notamment l'apprentissage renforcé pour l'évaluation de la résilience d'un SHM faisant face à des situations critiques. Pour l'évaluation multicritère de la résilience des SHMs, nous définissons d'abord les critères susceptibles d'affecter la résilience du système. En appliquant notre méthode d'évaluation de la résilience locale et globale sur chacun de ces critères, nous caractérisons par un vecteur d'indicateurs la résilience multicritères le SHM. Ensuite, nous exposons l'exploitation des indicateurs de résilience dans les processus d'apprentissage. Un outil a été développé sous Visual C++ pour le traitement des données expérimentales par les algorithmes fournis dans le chapitre 3. Une analyse des résultats de l'estimation de la résilience est effectuée par comparaison des trois algorithmes en termes d'efficacité. Nous procédons à une classification des différents équipages en termes de résilience et confrontons ces résultats à ceux obtenus par l'analyse de la démarche REACT proposée dans le projet.

L'analyse globale des différents résultats obtenus, nous permet de valider nos algorithmes d'apprentissage renforcé et de mettre en évidence la pertinence du couple d'indicateurs de la résilience. Certaines perspectives de recherche sont enfin abordées dans le chapitre suivant.

## 2 Présentation de la campagne expérimentale

Le projet REI-REACT pour « réactivité à l'imprévu et réinterprétation collective de la situation », est un projet de recherche exploratoire visant à évaluer les effets d'une démarche de raisonnement critique sur le fonctionnement d'un collectif hétérogène dans le but d'améliorer ses capacités de réactivité et d'adaptation coordonnées face à des événements imprévus. Ce projet a été financé par la DGA (Direction Générale de l'Armement français) et réalisé en partenariat entre l'Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis (UVHC), la société Dédale (Paris) et l'Université Technologique de Troyes (UTT).

L'objectif de la phase d'expérimentation est de valider nos algorithmes d'apprentissage renforcé pour l'évaluation de la résilience d'un Système Homme-Machine faisant face à des situations critiques. Nous évaluerons notamment la pertinence des trois types de renforcement proposés (Cf. section 4 du Chapitre 3). Dans cette section, nous décrivons le SHM retenu pour l'expérimentation, les scénarios conçus (types de situations critiques) ainsi que le déroulement de l'expérimentation.

### - Le dispositif expérimental

Le dispositif d'expérimentation utilisée est un simulateur de vol du Groupe de Ravitaillement en Vol (GRV) de la base aérienne militaire d'Istres (France). Le GRV est composé de pilotes, navigateurs et mécaniciens qui travaillent en équipage tournant de 4 personnes par vol. La Figure 32 illustre une vue du cockpit avec un d'équipage complet de 4 personnes : le pilote qui est le commandant de bord (CDB), son copilote (COPI), le navigateur (NAV) et de l'opérateur de ravitaillement en vol (ORV) qui est le mécanicien de bord.

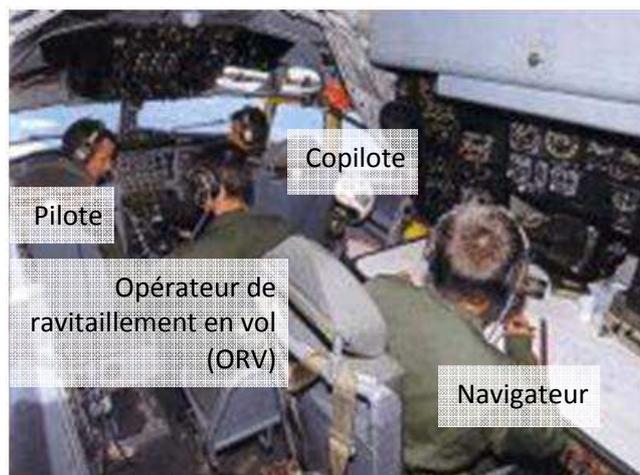


Figure 32. Equipage dans le simulateur de vol : un Boeing C-135 [Karsenty *et al.*, 2011]

Toutes les sessions ont été enregistrées à l'aide des équipements audio et vidéo intégrés au système du simulateur de vol. La Figure 33 présente le schéma du dispositif expérimental comprenant notamment un système de gestion du simulateur ainsi qu'un système d'enregistrement et de restitution audio/vidéo. Ce dernier enregistrerait l'ensemble des communications entre membres d'équipage (équipés de micros et de casques), mais aussi les échanges entre l'équipage et les acteurs extérieurs (centre technique contrôle trafic aérien). Une caméra, disposée à l'arrière en hauteur et prenant une vue d'ensemble du cockpit, filmait l'ensemble de la scène et permettait d'observer les 4 membres d'équipage comme illustré sur la Figure 32. La présence des observateurs 1 et 2 avait pour but de faire respecter le bon déroulement des scénarios.

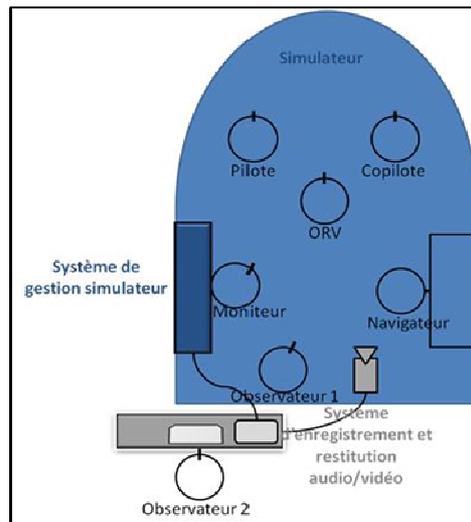


Figure 33. Schéma du dispositif expérimental [Karsenty *et al.*, 2011]

### - Les participants

Les participants à cette étude sont 24 personnels navigants de l'armée de l'air française, soit six équipages complets (4 personnes par équipages). Tous les participants sont habilités à voler avec l'avion ravitailleur simulé qui a été utilisé pour cette expérimentation, un Boeing C-135. La constitution des équipages a été effectuée selon les disponibilités des personnels.

L'âge, le grade, le parcours, le nombre d'années d'expérience, le nombre d'heures de vol total et le nombre d'heures de vol sur BC-135 de chaque membre d'équipage ont été relevés. Ces données ont été cumulées par équipage pour pouvoir les comparer entre eux (Cf. Tableau 11).

Tableau 11. Tableau de synthèse des profils par équipage

Equipage	Age	Années au GRV	Nombre d'heures de vol sur BC-135	Nb d'heure de vol total cumulé		
	Total	Total	Total	Classement	Equipage	Nb d'heures
1	134	25	7250	1	Equipage 2	11500
2	134	18,5	5500	2	Equipage 5	11400
3	121	13	3700	3	Equipage 4	10900
4	130	20,5	6320	4	Equipage 1	10750
5	127	22,5	6100	5	Equipage 3	5600
6	124	16	4430	6	Equipage 6	5500

Pour les données cumulées par équipage relatives à l'âge, au nombre d'années d'expérience au GRV ou le nombre d'heures de vol sur B-C135, aucune différence importante n'apparaît entre les équipages concernant. Néanmoins, deux équipages apparaissent un peu moins expérimentés si l'on prend en compte le nombre d'heures de vol total ; ce sont les équipages 3 et 6.

## - Les scénarios

Les deux scénarios retenus pour les expérimentations ont été conçus en collaboration avec les instructeurs de la base aérienne d'Istres et les moniteurs du simulateur de vol ; ces scénarios sont inspirés de retours d'expériences réels et répondent d'une part aux contraintes techniques du simulateur et d'autre part, aux exigences d'expérimentation telles que définir deux niveaux de charge de travail différents. En outre, une distinction peut être faite entre ces deux scénarios : le scénario 1 repose sur la détection de « signaux faibles » constitués de données subjectives (sensations, données difficilement quantifiables...) et le scénario 2 sur des « signaux forts » et des données objectives (perte évidente d'instruments, données mesurables ou testables...).

### *Scénario 1 : charge de travail et pression temporelle faibles*

Dans ce scénario 1, l'équipage doit convoier des conteneurs vides d'Orléans jusqu'à Nîmes, ce qui est un vol de routine dont la durée prévue est approximativement d'une heure. Mais lors du décollage, la course de l'avion s'avère beaucoup plus longue de d'habitude notamment parce que l'avion ne quitte le sol qu'en toute fin de piste. Aucune procédure préétablie n'est disponible pour ce type d'imprévu qui ne peut être perçue que grâce notamment à l'observation de l'instrumentation (indicateurs de vitesse) et des certaines sensations (manche dur, décollage long, etc.) en décalage avec les sensations habituelles.

L'avion au décollage a donc un temps d'accélération anormale (lente) malgré un bon fonctionnement des moteurs à puissance maximale. Au niveau du simulateur, ce dysfonctionnement est simulé en ajoutant progressivement du poids à l'avion pendant la phase de décollage via l'interface du système de gestion simulateur (Cf. Figure 33). La cause réelle de la vitesse anormale (événement imprévu) au décollage est le grippage progressif des roues de l'avion dû à une erreur de montage de roulements par l'équipe de maintenance au sol. Si l'évènement imprévu n'est pas détecté et traité positivement, la conséquence serait un dépassement du bout de piste lors de l'atterrissage.

Au niveau de l'équipage, les causes probables du ralentissement peuvent être multiples : blocage des freins, éclatements de pneus, poussée insuffisante des moteurs, masse excessive etc. De plus l'anomalie est difficilement vérifiable, l'accès direct au train d'atterrissage étant impossible. Aucune procédure n'est disponible pour ce type de problème. Cet imprévu présente des risques pour au moins deux raisons. En premier lieu, le terrain d'atterrissage initialement prévu est d'une longueur très limitée, ce qui implique de savoir quelle sera la longueur de la course à l'atterrissage. Ensuite, les risques d'incendie liés à un problème de train sont élevés et particulièrement dangereux sur un avion ravitailleur chargé en carburant. La pression temporelle et la charge de travail sont ici considérées comme faibles puisqu'une seule anomalie est présente et les réserves de carburant sont suffisantes pour rester plusieurs heures en vol. Plusieurs possibilités de déroutement existent. Les équipages ont le temps en vol et peu de pression pour essayer de comprendre le problème.

### *Scénario 2 : charge de travail et pression temporelle élevées*

Dans ce scénario 2, l'équipage doit ramener un avion piloter à vide et déjà en panne (pompe carburant défaillante) vers sa base pour réparation. Il s'agit d'un vol transatlantique sans possibilité de déroutement. L'équipage commence ce scénario en phase de vol au dessus de l'océan; à une heure des côtes, 2 vitres (pare-brises pilote et copilote) se mettent à givrer; l'équipage ne pourra dégivrer ces vitres qu'en passant la commande de réchauffage sur la position « *high* »; par suite, une odeur de brûlé apparaît et des fumées sont émises au niveau du transformateur n°1 de l'avion. Ensuite, une série de défaillances sans lien apparent se produisent : le rétro-éclairage est défectueux, tous les indicateurs du panneau carburant tombent en panne, plusieurs « *breakers* » sautent sur le panneau électrique, etc.

L'occurrence de ces évènements imprévus sous la forme de défaillances successives et en apparence isolées, ont en fait une origine commune : un problème électrique sur la phase C de la génératrice 1. En effet, la mise en marche (position «*high*») de la commande du réchauffage qui est branchée sur les 3 phases de la génératrice 1, entraîne la surchauffe de la phase C déjà défectueuse de la génératrice : le fusible de sécurité de cette phase, par ailleurs peu accessible et visible sur la tableau électrique, va donc disjoncter. Tous les systèmes utilisant cette phase, vont alors tomber en panne en faisant à leur tour disjoncter des fusibles.

Le niveau élevé de charge de travail de ce scénario réside dans le fait que les imprévus se succèdent et s'accumulent rapidement. Certains, comme le début d'incendie, obligent à des actions d'urgence (passage sous masque à oxygène et changement d'altitude). La perte de toutes les données carburant, associée à l'impossibilité d'atterrir ajoutent aussi du stress et impliquent de prendre des mesures rapides. Si le scénario dure ici aussi environ 1h, la densité des évènements impose une plus forte pression temporelle à l'équipage et laisse normalement moins de temps à l'analyse de la situation.

#### - Déroulement des expérimentations

Six équipages ont été mis à notre disposition. Chacun des équipages a passé les deux scénarios dans un ordre de passage fixe, *i.e.*, le scénario 1 /débriefing /Scénario 2 /débriefing. Les expérimentations se sont déroulées du 24 au 30 novembre 2010 dans les bâtiments du GRV sur le site de la base aérienne d'Istres. Une pause était aménagée entre les deux scénarios pour éviter un effet d'épuisement. Un débriefing, d'environ 30 minutes, était effectué à la fin de chaque scénario pour recueillir les impressions des membres d'équipage face aux situations rencontrées et d'analyser les décisions prises.

#### - Transcription des expérimentations

Un recueil des données est fait des différents passages des équipages grâce au système d'enregistrement et restitution audio/vidéo. La majorité des analyses effectuées lors de cette expérimentation a porté sur une étude des échanges verbaux des équipages et sur leurs principales actions. La première étape de l'analyse a été de retranscrire l'ensemble sur le modèle présenté dans le Tableau 12.

**Tableau 12. Modèle de transcription des expérimentations**

Temps	Message	Emetteur*	Destinataire	Actions
00:00	Le COPI, je crois que tu as la 2i (= vitre avant droite) qui commence à givrer.	ORV	COPI	
00:04	T'as les anti-ice?	ORV	COPI	
00:06	Moi j'ai les flight-ignition	COPI	ORV	
00:08	Là je mets les anti-ice	COPI	CDB	bouton sur ON
00:10	Regarde si elle est chaude la vitre	CDB	COPI	
00:13	Regarde si ça chauffe bien	ORV	COPI	

\* *COPI = copilote ; ORV = Opérateur de ravitaillement en vol ; CDB : commandant de bord*

Dans un fichier Excel, on note le plus fréquemment possible le temps et toutes les verbalisations en changeant de ligne à chaque changement d'interlocuteur ou après une rupture. On note également l'émetteur et le (ou les) destinataire(s) du message émis. On note également les actions particulières des différents membres d'équipage.

### 3 Apprentissage renforcé pour l'évaluation de la résilience

Afin d'évaluer la résilience du Système Homme-Machine, représenté ici par l'équipage de quatre personnes navigant dans l'avion simulé, nous avons définis quelques critères pertinents relatives à sécurité, à la charge de travail humaine et à la mission préétablie de l'équipage. Ces critères représentent les principaux facteurs affectant les capacités du SHM à faire face à des perturbations sans précédent.

#### 3.1. Définition des critères

##### - Le critère « sécurité »

Le critère « sécurité » noté  $S(t)$  et exprimé en pourcentage (%), est relatif l'état du SHM suite à l'occurrence des événements imprévus. Initialement, il n'y a pas d'occurrence d'événements imprévus, le niveau maximal du critère de sécurité est alors à 100%:

$$S(t) = S_{init}(t) = 100\% \quad (34)$$

L'occurrence des événements imprévus successifs - *e.g.*, le givrage des 2 vitres (pare-brises pilote et copilote), la surchauffe du transformateur n°1 suivi de fumée, la perte des indications de niveau carburant, etc. - à différents instants ( $t_i$ ) affectent ainsi le critère «sécurité » ( $S(t)$ ). En fonction de l'effet ou des conséquences des perturbations, on note  $E_i = \alpha, \beta, \dots$  où  $E_i$  représente les conséquences d'une perturbation à l'instant ( $t_i$ ) avec pour amplitudes ( $\alpha, \beta, \dots$ ) données en pourcentage. Ainsi, l'occurrence d'un événement imprévu affecte le critère sécurité qui décroît comme suit :

$$S(t) = S(t) - \begin{cases} \alpha & \text{si givrage vitres} \\ \beta & \text{si surchauffe transformateur} \\ \text{etc} \end{cases} \quad (35)$$

En cas d'occurrence multiple et simultanée des perturbations, le critère « sécurité » se définit comme suit :

$$S(t) = S(t) - \alpha - \beta - \dots \quad (36)$$

Si aucune action de récupération n'est appliquée, l'occurrence de toutes les perturbations conduisent le critère « sécurité » à son niveau minimale  $S(t)=0$ . Mais, en général, l'occurrence des perturbations entraîne des réactions des équipages pour y faire face. Les opérateurs vont tenter notamment de récupérer des perturbations. En conséquence, le critère « sécurité » va croître même en cas de perte de performance rémanente. Cette récupération est évaluée comme suit :

$$S(t) = S(t) + \begin{cases} \alpha - \Delta\alpha & \text{si récupération givrage vitres} \\ \beta - \Delta\beta & \text{si récupération surchauffe transformateur} \\ \text{etc} \end{cases} \quad (37)$$

Avec  $\Delta\alpha$  ou  $\Delta\beta \dots$  (*e.g.*, on fixe  $\Delta=0,2$ ) représentant les pertes de performances rémanentes.

##### - Le critère de charge de travail humaine

Le critère «charge de travail humaine disponible» exprimée en (%), est relatif aux nombre d'interactions entre le personnel navigant (*i.e.*, la fréquence des communications entre opérateurs) et entre l'équipage et le système technique (*e.g.*, réalisation des procédures standards, applications d'actions spécifiques, etc.). Initialement, l'équipage est libre de toutes interactions, la «charge de travail (ou workload) disponible » est donc maximale :

$$W(t) = W_{init}(t) = 100\% \quad (38)$$

Afin d'accomplir leurs objectifs ou la mission préétablie et pour faire face aux perturbations, l'équipage aura à appliquer des procédures standards, des actions diverses, à communiquer en interne et avec le centre technique afin de trouver les mesures appropriées de contrôle, etc. Ces différents comportements, visant à surmonter les événements imprévus, concourent à augmenter la charge de travail humaine. Par suite la « charge de travail disponible » diminue en fonction du nombre ou de la demande en termes de fréquence des communications de l'équipage, du nombre de procédures effectuées ou d'actions appliquées, etc. Par suite, la « charge de travail disponible » se définit :

$$S_w(t) = S_w(t) - \xi \times ((\text{nombre de communications}) + (\text{nombre de procédures}) + (\text{nombre d'actions})) \quad (39)$$

Où le facteur  $\xi=0,1\%$  basé d'une part, sur « la charge de travail disponible » maximale  $W_{init}(t)$  (Cf. équation 5) et d'autre part, sur le nombre maximal d'interaction entre opérateurs et entre Hommes-Machine : *e.g.*, pour 1000 interactions, le critère « charge de travail disponible » décroît jusqu'à 0%, *i.e.* :

$$W(t) = W_{init}(t) - \xi * 1000 = 100\% - (0,1\% \times 1000) = 0\% \quad (40)$$

#### - Le critère de mission

Le critère « mission » exprimée en (%), est relatif au respect de l'heure et du lieu d'atterrissage de l'avion. En l'absence d'événements imprévus, l'équipage est censé respecter la mission qui lui est assignée en terme d'heure et de lieu d'atterrissage. Du fait de l'occurrence des perturbations, l'équipage peut procéder à des changements en termes d'horaires (la mise attente en plein vol) et de lieu d'atterrissage, comme le fait de dérouter l'avion vers un autre lieu d'atterrissage. Des pénalités sont alors associées en fonction des conséquences de ces changements sur l'horaire et surtout le lieu d'atterrissage :

$$M(t) = M(t) - \text{pénalités}(t) \quad (41)$$

Le critère « mission » est une corrélation entre le critère « sécurité » du système (*e.g.*, le changement de lieu d'atterrissage concoure à l'amélioration de la sécurité du système) et sa charge de travail associée (*i.e.*, les procédures et les actions appliquées pour faire face aux perturbations). L'évolution de ces critères et par suite la résilience locale et globale associée peuvent alors être évaluées au cours d'un scénario.

#### - Evolution des critères

Initialement, tous les critères sont à 100% : pas d'occurrence d'évènement imprévu, aucune interaction et aucun changement dans la mission préétablie. Face aux occurrences d'événements imprévus, les équipages doivent réagir pour comprendre la situation critique en cours, afin de déterminer les actions à mener. Pour évaluer l'évolution des critères définis, nous considérons l'ensemble des facteurs (occurrence ou récupération d'événements imprévus, nombre d'interactions, etc.) affectant chaque critère tel que présenté dans les équations 34-40.

Chaque équipage détecte et annonce (ou non) au fur et à mesure les divers événements perturbateurs. Une amplitude est affectée à chacune des perturbations imprévues en fonction de leur criticité et de leurs conséquences probables sur le SHM.

### *Pour le scénario 1*

Dans ce scénario, la cause réelle de l'anomalie est le grippage des roues de l'avion. Plusieurs événements imprévus permettent de s'en rendre compte : au décollage, le besoin de puissance supplémentaire avec le manche de poussée qui devient dur et un décollage anormalement long. Si ces faits ne sont pas perçus, à l'atterrissage, ce sera l'accident lors des opérations de freinage et de roulage de l'avion.

Le critère « sécurité » dépend de l'occurrence des événements imprévus (équations 34-37). La transcription du scénario permet de repérer les instants d'occurrence et de détection des perturbations par l'équipage ainsi que les instants de récupération. Les amplitudes  $E_i$  des perturbations sur le critère « sécurité » sont définies en fonction des conséquences possibles (ou la criticité) de la perturbation. L'accumulation des perturbations conduit le critère « sécurité » à s'annuler si rien n'est perçu et traité:

- Problème de manque de puissance, de manche dur, de décollage long : l'amplitude  $\kappa=15\%$  ;
- Problème de freinage ( $\lambda=30\%$ ) et problème de roulage sur piste ( $\nu=25\%$ ).

Le critère « charge de travail disponible » dépend du nombre d'interactions entre les opérateurs et la machine (équations 38-40).

Le critère « mission » (équation 41) dépendra des actions et décisions affectant l'heure ou l'emplacement de l'atterrissage : tels que dérouter le vol vers l'emplacement X d'atterrissage, la durée de mise en attente et/ou le changement de plan de vol, etc. Les pénalités associées à ces changements vont de ( $\eta =10\%$ ) pour une mise en attente de 10 min à ( $\iota=30\%$ ) pour un déroutage vers un lieu X qui change carrément la mission préétablie;

### *Pour le scénario 2*

Pour ce scénario 2, les amplitudes ou effets des perturbations sur le critère « sécurité » sont définies en fonction de la criticité de la perturbation:

- le "givrage des vitres" : l'amplitude  $\alpha=10\%$  est faible car le danger n'est pas imminent ;
- la "surchauffe du transformateur TR accompagné de fumée" : il faut éteindre le feu dans les minutes qui suivent, l'avion simulé étant un ravitailleur en vol. La criticité de cette perturbation est avérée et donc son amplitude est importante ( $\beta=30\%$ ) ; etc.

Nous résumons dans le Tableau 13, les amplitudes relatives aux différents événements sans précédent qui affectent le critère « sécurité ». Ces amplitudes sont identiques pour chaque équipage.

**Tableau 13. Effets des événements sur le critère «sécurité»**

<b>Evènements</b>	<b>Effet (%)</b>
Givrage des vitres	$\alpha =10$
Fumée transformateur TR	$\beta = 30$
Panneau carburant défaillant	$\gamma = 10$
Problème breakers	$\delta=15$
Commande de pompe carburant en panne	$\varepsilon=15$
Problème Fusible phase C	$\zeta=20$

Les critères « charge de travail disponible » et « mission » évoluent en fonction des facteurs les affectant sur le même principe que dans le scénario 1.

### 3.2. Analyse des résultats de l'estimation de la résilience

Dans cette section, nous abordons l'exploitation des indicateurs de résilience dans les processus d'apprentissage. Nous avons défini les critères « sécurité », « charge de travail disponible » et « mission. Le critère « charge de travail disponible » est relatif au nombre d'interactions de l'équipage. Ce critère et par suite la résilience locale et globale associées peut être évalué directement « en ligne ». Il en est de même pour le critère « mission ». Par contre, le critère « sécurité » est lié aux instants d'occurrences ou de récupérations des événements sans précédents ; il ne peut alors être évalué directement mais *a posteriori* puisque ces instants ne sont pas connus à l'avance. Nous procéderons donc à l'estimation de la séquence résilience locale et globale « sécurité » par l'intermédiaire de nos trois algorithmes d'apprentissage renforcé (section 3 du Chapitre 3). Ce qui nous permettrait d'évaluer pour un instant ( $t_i$ ) donné, l'état d'un SHM par un vecteur complet d'indicateurs de résilience illustré par l'équation 42 :

$$V_{t_i} = \left\{ \begin{array}{l} \text{résilience\_locale\_charge\_de\_travail}(t_i), \text{résilience\_globale\_charge\_de\_travail}(t_i), \\ \text{résilience\_locale\_mission}(t_i), \text{résilience\_globale\_mission}(t_i), \\ \text{résilience\_locale\_sécurité}(t_i), \text{résilience\_globale\_sécurité}(t_i) \end{array} \right\} \quad (42)$$

Un outil développé sous Visual C++, a été mis en œuvre pour l'exploitation des indicateurs. Ce développement d'outil fait suite au projet de [Ziéba et Sip, 2005] et s'appuiera donc sur leurs travaux. Dans le cadre de nos travaux, l'estimation de la résilience locale et globale « sécurité » s'effectue *a posteriori*. Néanmoins, l'objectif à terme est d'effectuer une estimation « en ligne » dans le but de d'évaluer la résilience d'un SHM à un instant donné.

Les données du vecteur d'entrée du réseau de neurones sont les indicateurs de la résilience locale et globale relative à la « mission » et à « la charge de travail disponible ». Ces indicateurs sont prétraités tel que décrit dans le chapitre 3, les valeurs sont entre [-1 1]. Le taux d'apprentissage initial (proche de 1) est initialisé à 0,95. La fonction de similarité utilisée est la distance euclidienne et pour la fonction de réajustement, nous avons opté pour une fonction de voisinage à seuil. A travers divers tests d'essai, la topologie du réseau de neurones retenue est une carte de dimension 5x5. La mise en œuvre des algorithmes consiste à estimer à chaque instant ou itération ( $t_i$ ), la résilience locale et globale « sécurité » pour compléter la séquence d'indicateurs du vecteur ( $V_{t_i}$ ) correspondant à l'état de SHM en termes de résilience.

Nous comparons ensuite ces indicateurs de résilience estimés aux valeurs réelles de résilience évaluées *a posteriori*. Puis, nous procédons à une analyse de l'apport du renforcement à l'estimation.

#### - Apprentissage par renforcement des paramètres d'estimation

##### Scénario 1 : Résultats de l'estimation pour l'équipage 3

L'application de l'algorithme de renforcement des paramètres d'estimation, nous permet d'obtenir les résiliences locales et globales « sécurité » estimées. Nous procédons ensuite à une comparaison entre les indicateurs de résilience mesurés *a posteriori* et ceux estimés par l'intermédiaire de notre algorithme de renforcement des paramètres d'estimation. Dans le scénario 1 et pour l'équipage 3, les résultats de la comparaison de la résilience locale « sécurité » mesurée et celle estimée est présentée sur la Figure 34. La Figure 35 quant à elle présente la comparaison entre la résilience globale « sécurité » mesurée après coup et celle estimée.

Les itérations correspondent à des instants spécifiques (occurrences des conséquences des imprévus, récupération des perturbations par les équipages, de décision de mis en attente ou de déroutement, etc.) du déroulement des expérimentations, pour lesquels il est possible d'évaluer les différents critères, puis la résilience locale et globale associées.

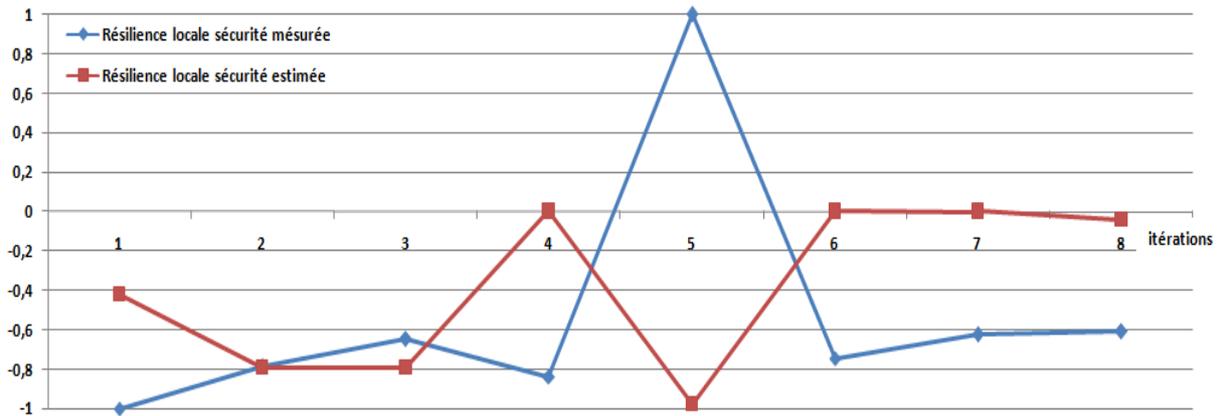


Figure 34. Scénario 1 : courbes de la résilience locale «sécurité» mesurée et celle estimée de l'équipage 3

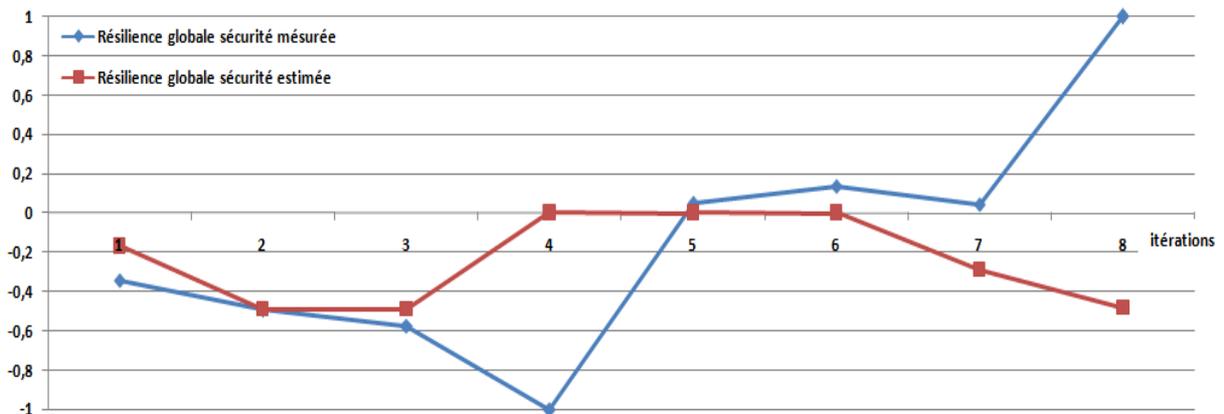


Figure 35. Scénario 1 : courbes de la résilience globale «sécurité» mesurée et celle estimée de l'équipage 3

Les comparaisons montrent qu'il existe des écarts entre les valeurs d'indicateurs de résilience locale ou globale « sécurité » mesurées et estimées. Les écarts algébriques [estimée-mesurée] donnent la distribution des écarts d'estimation et restent donc limités. Aussi, et pour chaque itération, nous nous intéressons au calcul de l'erreur absolue |estimée-mesurée| qui permet d'avoir l'amplitude de ces écarts entre valeurs mesurées et valeurs estimées. Pour l'équipage 3, les erreurs absolues d'estimation de la résilience locale et globale « sécurité » sont résumées sur la Figure 36.

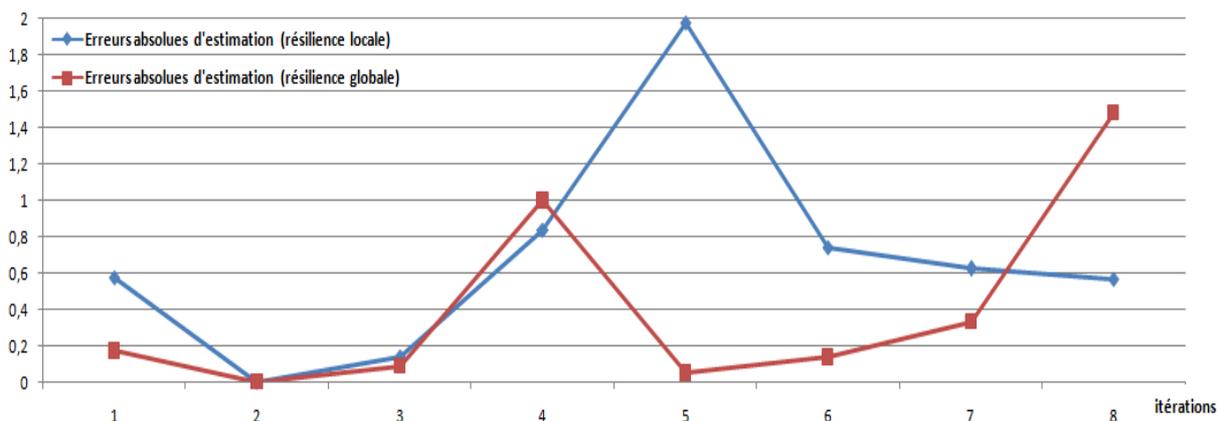


Figure 36. Scénario 1 : erreur absolue d'estimation de la résilience locale et globale «sécurité» pour l'équipage 3

Pour l'estimation de la résilience globale «sécurité», l'erreur absolue reste inférieure à 0,2 sauf pour quelques itérations notamment les itérations 4 et 8. Par suite, on a une erreur absolue moyenne (MAE pour Mean Absolute Error) de MAE=0,4. L'erreur moyenne (ME pour

Mean Error) qui est une moyenne arithmétique des écarts donne  $ME = -0,092$ . Par contre, pour l'estimation de la résilience locale, l'erreur absolue est supérieure à 0,6. Ce qui donne une  $MAE = 0,685$  et une  $ME = 0,15$ . La comparaison des deux MAE, nous permet de conclure que l'estimation de la résilience globale est meilleure que celle de la résilience locale.

Il ne s'agit que des résultats du seul équipage 3. Pour quantifier les capacités de notre estimateur et valider nos algorithmes, nous calculons outre la MAE, pour tous les équipages et pour chaque scénario, l'erreur quadratique moyenne (MSE pour Mean Square Error). La MSE est la moyenne arithmétique des carrés des écarts entre les estimations et les mesures.

Les indicateurs d'écart (MAE et MSE) serviront à comparer les algorithmes par rapport à une série d'estimations. L'algorithme le plus efficace sera celui qui présente le MSE (et le MAE) le plus faible. La qualité d'un algorithme par rapport à un autre sera également évaluée par le calcul du taux d'estimation correcte : c'est le pourcentage d'itérations où l'algorithme donne une meilleure estimation que l'autre.

### Scénario 1 : Validation de l'algorithme du renforcement des paramètres d'estimation

Il s'agit d'évaluer l'apport de la fonction de renforcement des paramètres d'estimation pour l'évaluation des indicateurs de résilience locale et globale « sécurité ». En effet, dans l'algorithme du renforcement des paramètres d'estimation, une fonction d'erreur de renforcement  $f(\varepsilon_{[i]}) = -\varepsilon_{[i]}$  est intégrée en prenant en compte les situations passées, interprétées à partir d'indicateurs de résilience. Nous souhaitons comparer l'estimation par renforcement des paramètres au cas où cette fonction de renforcement n'est pas utilisée.

Nous calculons la différence d'erreur absolue (AE pour Absolute Error) :  $\Delta AE = AE(\text{renforcée}) - AE(\text{non renforcée})$ . Ainsi, pour chaque itération, si  $\Delta AE < 0$  alors le renforcement des paramètres d'estimation donne de meilleurs résultats d'estimation que le cas sans renforcement. Les résultats de calcul de la différence d'erreur absolue obtenue pour l'équipage 3, est illustrée sur la Figure 37.

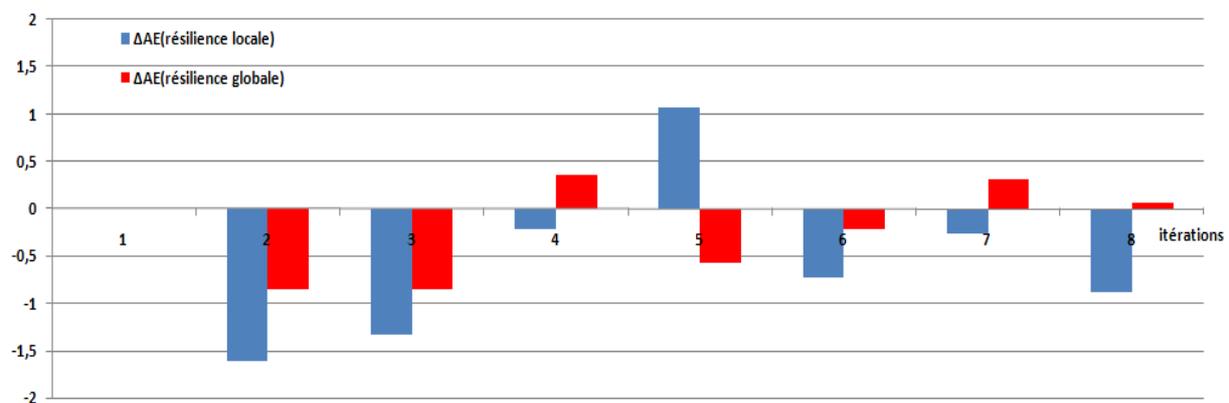


Figure 37. Scénario 1 : différence d'erreurs absolues de l'estimation de la résilience locale et globale « sécurité » pour l'équipage 3

On calcule également le taux d'estimation correcte (Taux), *i.e.* le pourcentage d'itérations où le renforcement permet d'avoir de meilleurs résultats d'estimation (avec  $\Delta AE < 0$ ). La première itération est exclue car il n'y a pas de renforcement. Pour l'équipage 3, Les taux  $Taux > 50\%$  (Tableau 14). Pour l'estimation de la résilience locale « sécurité », on a la  $MSE_{\text{avec renforcement}} = 0,78$  qui bien inférieur à la  $MSE_{\text{sans renforcement}} = 1,51$ . De plus on a la différence d'erreur absolue moyenne de l'équipage 3 ( $\Delta MAE = -0,49$ )  $< 0$ , par suite l'algorithme de renforcement des paramètres d'estimation est meilleur que le cas sans fonction de renforcement. Il en est de même pour l'estimation de la résilience globale « sécurité ».

Pour le scénario 1, nous résumons dans le Tableau 14, les calculs d'erreur quadratique moyenne (pour les deux cas avec ou sans renforcement), du taux d'estimation correcte et de la différence d'erreur absolue moyenne relatif à l'estimation de la résilience locale et globale « sécurité » pour chacun des six équipages.

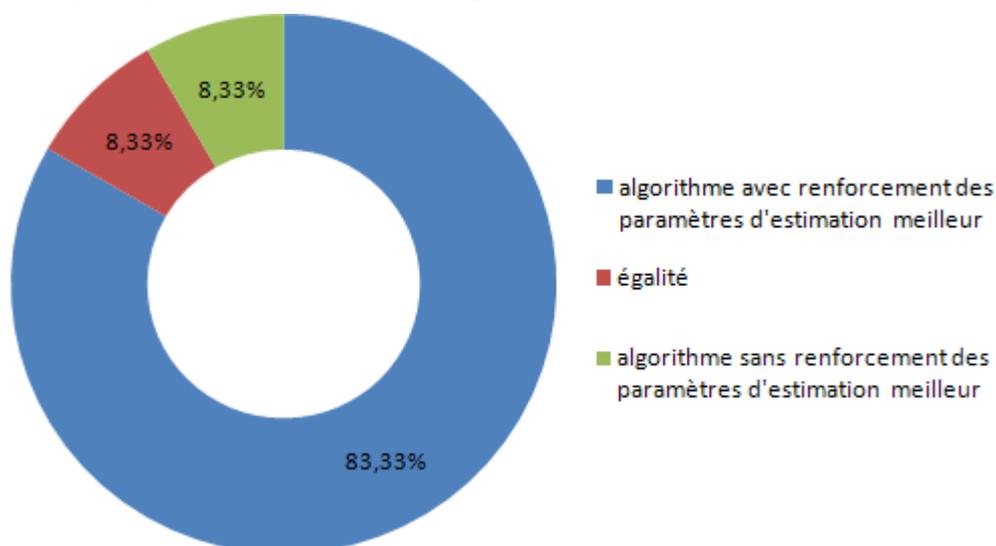
**Tableau 14. Calculs des erreurs absolues moyennes, erreurs quadratiques moyennes, taux d'estimation correcte relatifs à la résilience locale et globale « sécurité » de tous les équipages lors du scénario 1**

<b>SCENARIO 1 : résultats pour la résilience locale</b>				
<b>Equipage</b>	<b><math>\Delta</math>MAE</b>	<b>Taux (%)</b>	<b>MSE (avec renforcement)</b>	<b>MSE (sans renforcement)</b>
Equipage 1	-0,28	85,71	0,25	0,55
Equipage 2	-0,27	75	0,55	1,24
Equipage 3	-0,49	85,71	0,78	1,51
Equipage 4	-0,27	85,71	0,55	1,24
Equipage 5	-0,22	100	0,14	0,40
Equipage 6	0,05	60	0,82	0,81
<b>Moyenne</b>	<b>-0,246</b>	<b>82</b>	<b>0,51</b>	<b>0,96</b>
<b>SCENARIO 1 : résultats pour la résilience globale</b>				
<b>Equipage</b>	<b><math>\Delta</math>MAE</b>	<b>Taux (%)</b>	<b>MSE (avec renforcement)</b>	<b>MSE (sans renforcement)</b>
Equipage 1	-0,39	85,71	0,39	0,78
Equipage 2	-0,18	62,5	0,82	1,42
Equipage 3	-0,22	57,14	0,42	0,57
Equipage 4	-0,18	57,14	0,82	1,42
Equipage 5	-0,32	100	1,19	2,15
Equipage 6	0,175	40	0,84	0,42
<b>Moyenne</b>	<b>-0,186</b>	<b>67,1</b>	<b>0,74</b>	<b>1,13</b>

Pour l'estimation de la résilience locale « sécurité », pour les cinq premiers équipages, l'algorithme de renforcement des paramètres d'estimation est meilleur que le cas sans renforcement. En effet, les erreurs quadratiques moyennes (MSE) du cas avec renforcement des paramètres d'estimation sont inférieures à celles du cas sans fonction de renforcement; de plus les différences d'erreurs moyennes absolues sont strictement négatives ( $\Delta$ MAE<0). Le cas de l'équipage 6 représente une exception. L'erreur quadratique moyenne donne ( $MSE_{\text{avec renforcement}}=0,82$ ) dans le cas de l'algorithme de renforcement des paramètres, est similaire à celle du cas sans renforcement ( $MSE_{\text{sans renforcement}}=0,81$ ) ; ce qui est confirmé par la ( $\Delta$ MAE=0,05) non négatif et un plus faible taux d'estimation correcte (Taux=60%). Mais globalement, l'algorithme de renforcement des paramètres d'estimation donne de meilleurs résultats que le cas sans renforcement au vu des valeurs moyennes du tableau.

Pour l'estimation de la résilience globale « sécurité » des six équipages, nous faisons les mêmes constats. L'algorithme de renforcement des paramètres d'estimation donne de meilleurs résultats pour les cinq premiers équipages. Le cas de l'équipage 6, constitue également une exception mais avec une erreur quadratique moyenne ( $MSE_{avec\ renforcement} = 0,84$ ) dans le cas de l'algorithme de renforcement des paramètres, bien supérieure (le double) à celle du cas sans renforcement ( $MSE_{sans\ renforcement} = 0,42$ ); le cas sans fonction de renforcement donne alors de meilleurs résultats que l'algorithme de renforcement des paramètres d'estimation, d'autant qu'on a un taux d'estimation faible (Taux=40%) et une différence d'erreurs moyennes positive ( $\Delta MAE = 0,175$ ). Mais globalement, l'algorithme de renforcement des paramètres d'estimation donne de meilleurs résultats que le cas sans renforcement au vu des valeurs moyennes du tableau.

En résumé, notre algorithme de renforcement des paramètres d'estimation permet d'avoir de meilleures estimations et met en évidence la pertinence de la fonction de renforcement. Sur les 12 cas d'estimation (estimation de la résilience locale et globale « sécurité » des six équipages) : on a 10 cas où notre algorithme donne de meilleurs résultats soit 83,3% des cas, un cas d'égalité (8,3%) et 1 cas où le non renforcement des paramètres d'estimation est meilleur soit (8,3%) comme illustré sur la Figure 38.



**Figure 38. Distribution des performances des algorithmes avec et sans renforcement des paramètres d'estimation**

### *Scénario 2 : Résultats de l'estimation pour l'équipage 1*

Nous procédons également à une comparaison entre les indicateurs de résilience mesurés *a posteriori* et ceux estimés par l'intermédiaire de notre algorithme de renforcement des paramètres d'estimation. Dans le scénario 2 et pour l'équipage 1, les résultats de la comparaison de la résilience locale « sécurité » mesurée et celle estimée est présentée sur la Figure 39. La Figure 40 quant à elle présente la comparaison entre la résilience globale « sécurité » mesurée et celle estimée.

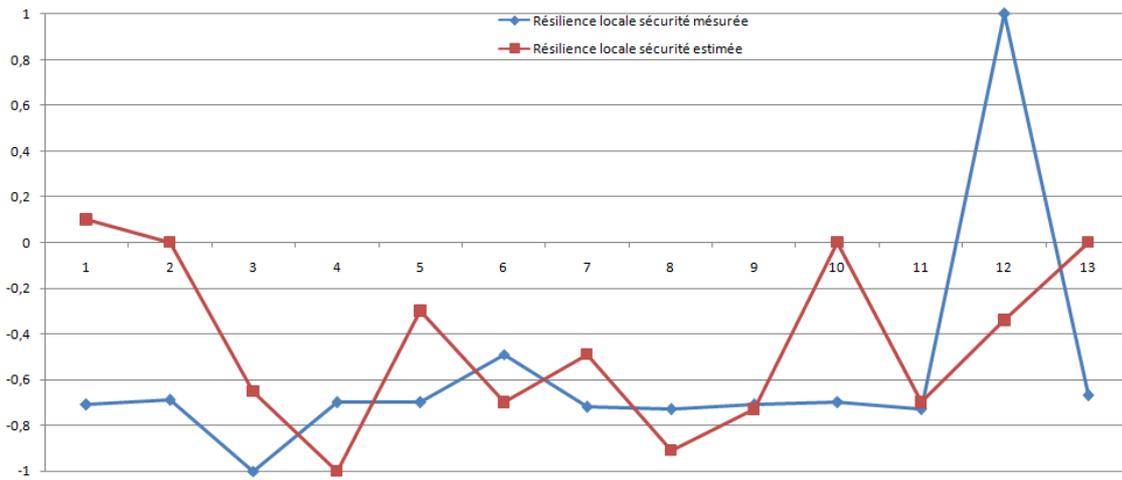


Figure 39. Scénario 2 : courbes de la résilience locale «sécurité» mesurée et celle estimée de l'équipage 1

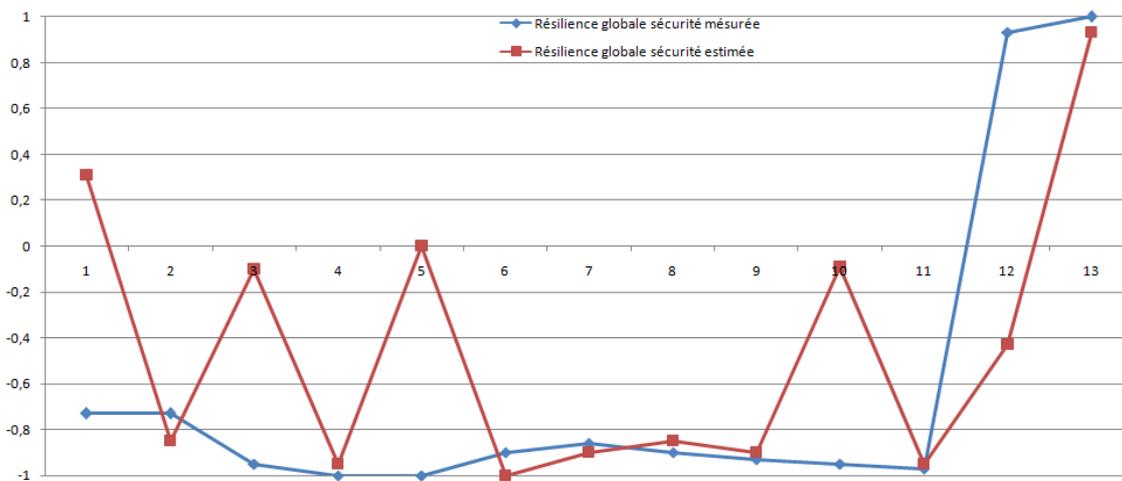


Figure 40. Scénario 2 : courbes de la résilience globale «sécurité» mesurée et celle estimée de l'équipage 1

Pour cet équipage 1, les erreurs absolues d'estimation |estimée-mesurée| de la résilience locale et globale « sécurité » correspondantes sont par suite illustrées sur la Figure 41.

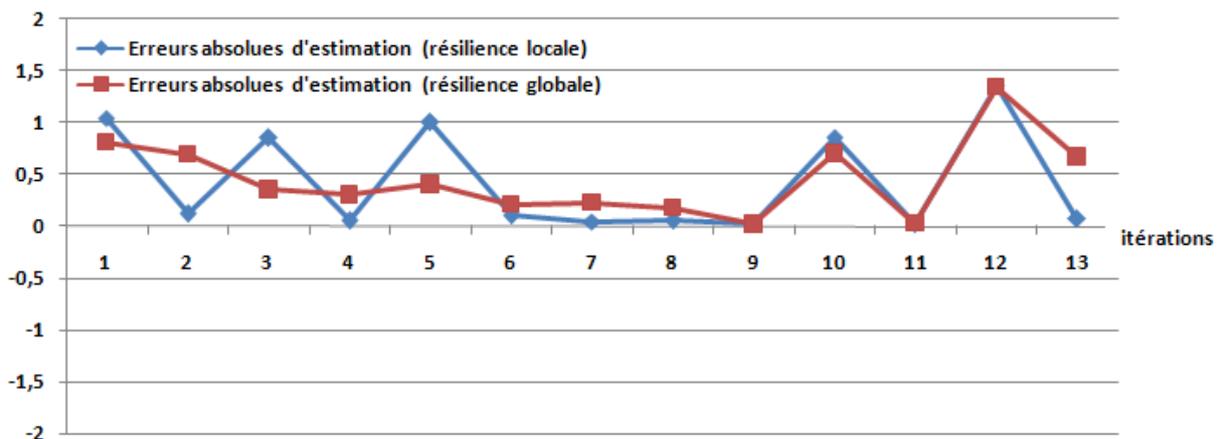


Figure 41. Scénario 2: erreur absolue d'estimation de la résilience locale et globale «sécurité» pour l'équipage 1

Pour l'estimation de la résilience globale «sécurité», on a une erreur absolue moyenne (MAE=0,456) et une des écarts arithmétiques moyennes de ME=0,14. Pour l'estimation de la résilience locale, la MAE=0,43 et une ME=0,17. Nous avons des écarts arithmétiques faibles. Comme dans l'étude précédente, nous procédons à la comparaison de notre algorithme d'estimation par renforcement des paramètres avec le cas sans fonction de renforcement.

*Scénario 2 : Validation de l’algorithme du renforcement des paramètres d’estimation*

Pour le scénario 2, nous résumons également dans le Tableau 15 les calculs d’erreur quadratique moyenne (pour les deux cas avec ou sans renforcement), de taux d’estimation correcte et de la différence d’erreur absolue moyenne relatif à l’estimation de la résilience locale et globale « sécurité » pour chacun des six équipages.

**Tableau 15. Calculs des erreurs absolues moyennes, erreurs quadratiques moyennes, taux d’estimation correcte relatifs à la résilience locale et globale « sécurité » de tous les équipages lors du scénario 2**

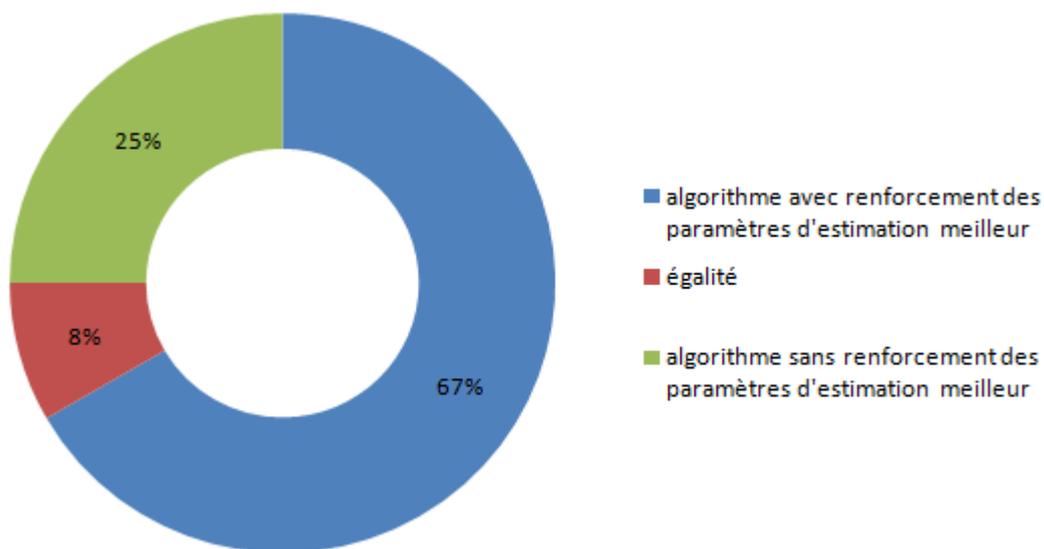
<b>SCENARIO 2 : résultats pour la résilience locale</b>				
<b>Equipage</b>	<b>ΔMAE</b>	<b>Taux (%)</b>	<b>MSE (avec renforcement)</b>	<b>MSE (sans renforcement)</b>
Equipage 1	-0,29	83,3	0,41	0,90
<i>Equipage 2</i>	<i>0,05</i>	<i>62,5</i>	<i>0,46</i>	<i>0,34</i>
<i>Equipage 3</i>	<i>0,06</i>	<i>33,33</i>	<i>0,88</i>	<i>0,62</i>
Equipage 4	-0,125	66,67	0,53	0,68
Equipage 5	-0,28	66,67	0,71	0,94
Equipage 6	-0,43	91	0,51	1,05
<b>Moyenne</b>	<b>-0,17</b>	<b>67,24</b>	<b>0,58</b>	<b>0,75</b>
<b>SCENARIO 2 : résultats pour la résilience globale</b>				
<b>Equipage</b>	<b>ΔMAE</b>	<b>Taux (%)</b>	<b>MSE (avec renforcement)</b>	<b>MSE (sans renforcement)</b>
Equipage 1	-0,15	58,3	0,33	0,48
<i>Equipage 2</i>	<i>0,19</i>	<i>37,5</i>	<i>1,14</i>	<i>0,54</i>
Equipage 3	-0,5	83,33	0,43	1,22
<i>Equipage 4</i>	<i>0,06</i>	<i>44,44</i>	<i>0,28</i>	<i>0,17</i>
Equipage 5	-0,05	66,67	0,15	0,14
Equipage 6	-0,33	63,64	0,44	0,99
<b>Moyenne</b>	<b>-0,13</b>	<b>59</b>	<b>0,46</b>	<b>0,59</b>

Pour l’estimation de la résilience locale « sécurité » pour les équipages 1 et 4 à 6, l’algorithme de renforcement des paramètres d’estimation est meilleur que le cas sans renforcement. En effet, les erreurs quadratiques moyennes (MSE) du cas renforcement sont inférieures à celles du cas sans fonction de renforcement; de plus les différences d’erreurs moyennes absolues sont strictement négatives ( $\Delta MAE < 0$ ). Les cas des équipages 2 et 3 représentent des exceptions avec des erreurs quadratiques moyennes (respectivement  $MSE_{\text{avec renforcement}} = 0,46$  et  $0,88$ ) dans le cas de l’algorithme de renforcement des paramètres, supérieures à celle du cas sans renforcement (respectivement  $MSE_{\text{sans renforcement}} = 0,34$  et  $0,62$ ). Ce qui est confirmé par les erreurs moyennes absolues (respectivement  $\Delta MAE = 0,05$  et  $0,06$ ) non négatif et de faibles taux d’estimation correcte notamment pour l’équipage 3 (Taux=33,33%) ; le cas de l’équipage 2 pouvant être considéré comme une égalité des deux algorithmes puisqu’on un taux d’estimation correcte Taux=62,5%. Mais globalement, l’algorithme de renforcement des paramètres d’estimation donne de meilleurs résultats que le cas sans renforcement au vu des valeurs moyennes du tableau.

Pour l’estimation de la résilience globale « sécurité » des six équipages, nous faisons les mêmes constats. L’algorithme de renforcement des paramètres d’estimation donne de meilleurs résultats pour les équipages 1, 3, 5 et 6. Les cas des équipages 2 et 4, constitue également des exceptions avec des erreurs quadratiques moyennes (respectivement  $MSE_{\text{avec}}$

$\text{renforcement} = 1,14$  et  $0,28$ ) dans le cas de l'algorithme de renforcement des paramètres, supérieure à celles du cas sans renforcement (respectivement  $\text{MSE}_{\text{sans renforcement}} = 0,54$  et  $0,17$ ); le cas sans fonction de renforcement donne alors de meilleurs résultats que l'algorithme de renforcement des paramètres d'estimation d'autant qu'on a des taux d'estimation faible (respectivement Taux= $37,5\%$  et  $44,44\%$ ) et des erreurs moyennes positives (respectivement  $\Delta\text{MAE} = 0,19$  et  $0,06$ ). Néanmoins, l'algorithme de renforcement des paramètres d'estimation donne globalement de meilleurs résultats que le cas sans renforcement au vu des valeurs moyennes du tableau.

En résumé, notre algorithme de renforcement des paramètres d'estimation permet d'avoir de meilleures estimations et met en évidence la pertinence de la fonction de renforcement. Sur les 12 cas d'estimation (estimation de la résilience locale et globale « sécurité » des six équipages) : on a 8 cas où notre algorithme donne de meilleurs résultats soit  $66,7\%$  des cas, un cas d'égalité ( $8,3\%$ ) et 3 cas où le non renforcement des paramètres d'estimation est meilleur soit  $25\%$  comme illustré sur la Figure 42.



**Figure 42. Distribution des performances des algorithmes avec et sans renforcement des paramètres d'estimation**

Les résultats présentés, nous ont permis de valider notre algorithme de renforcement des paramètres d'estimation et surtout de mettre en évidence la pertinence du renforcement au travers d'une fonction d'erreur.

Nous désirons par suite confronter les résultats d'estimation de nos trois algorithmes entre eux afin de retenir le plus performant. La comparaison entre l'algorithme de renforcement des paramètres d'estimation et celui de renforcement de la base de connaissance ou celui du double renforcement, ne peut être objective : pour la mise en œuvre de chaque algorithme, la base de connaissance associée aux neurones du réseau est initialisée aléatoirement pour chaque cas puisqu'on ne dispose pas de données "expertes" sur les indicateurs de résilience du SHM faisant face à des situations sans précédents. La comparaison ne peut se faire car chaque base de connaissances initiale est différente l'une de l'autre. Néanmoins, dans le cas de l'algorithme du double renforcement, on associe le renforcement de la base de connaissance à un renforcement des paramètres d'estimation. Il nous est alors possible, d'évaluer la pertinence de la fonction de renforcement des paramètres d'estimation dans le cas du double renforcement. Nous allons donc comparer, dans le cas de l'algorithme du double renforcement, les valeurs estimées en intégrant la fonction de renforcement  $f(\epsilon_{[i]}) = -\epsilon_{[i]}$  à une estimation n'intégrant pas cette fonction d'erreur, donc basée sur le renforcement de la base de connaissances seul.

- **Double renforcement Vs renforcement de la base de connaissances**

*Scénario 1 : Validation des algorithmes*

Pour le scénario 1 et pour les deux cas (renforcement de la base de connaissances, double renforcement), nous résumons également dans le Tableau 16, les calculs d'erreur quadratique moyenne, de taux d'estimation correcte et de la différence d'erreur absolue moyenne relatif à l'estimation de la résilience locale et globale « sécurité » pour chacun des six équipages.

**Tableau 16. Calculs des erreurs absolues moyennes, erreurs quadratiques moyennes, taux d'estimation correcte relatifs à la résilience locale et globale « sécurité » de tous les équipages lors du scénario 1**

<b>SCENARIO 1 : résultats pour la résilience locale</b>				
<b>Equipage</b>	<b><math>\Delta</math>MAE</b>	<b>Taux (%)</b>	<b>MSE (double renforcement)</b>	<b>MSE (renforcement base)</b>
Equipage 1	-0,45	100	0,18	0,64
Equipage 2	-0,53	71,42	0,46	1,58
Equipage 3	-0,68	83,33	0,42	1,47
Equipage 4	-0,15	57,14	0,62	0,95
Equipage 5	-0,53	100	0,33	1,17
Equipage 6	-0,146	75	0,36	0,43
<b>Moyenne</b>	<b>-0,415</b>	<b>81,14</b>	<b>0,4</b>	<b>1,04</b>
<b>SCENARIO 1 : résultats pour la résilience globale</b>				
<b>Equipage</b>	<b><math>\Delta</math>MAE</b>	<b>Taux (%)</b>	<b>MSE (double renforcement)</b>	<b>MSE (renforcement base)</b>
Equipage 1	-0,54	83,33	0,40	1,28
Equipage 2	-0,29	100	0,28	0,74
Equipage 3	-0,17	100	0,33	0,57
Equipage 4	-0,66	85,71	0,40	1,44
Equipage 5	-0,57	75	0,21	1,52
Equipage 6	-0,144	50	0,22	0,40
<b>Moyenne</b>	<b>-0,395</b>	<b>82,34</b>	<b>0,3</b>	<b>0,99</b>

Pour l'estimation de la résilience locale et globale « sécurité » pour tous les six équipages, l'algorithme du double renforcement est meilleur que l'algorithme de renforcement de la base de connaissances. En effet, toutes les erreurs quadratiques moyennes ( $MSE_{\text{double renforcement}}$ ) dans le cas de l'algorithme du double renforcement sont inférieures à celles ( $MSE_{\text{renforcement base}}$ ) du cas avec l'algorithme de renforcement de la base de connaissances. De plus les différences d'erreurs moyennes absolues sont strictement négatives ( $\Delta MAE < 0$ ) et tous les taux d'estimation correcte sont au moins supérieurs à 50% (cas de l'équipage 6 lors de l'estimation de la résilience globale « sécurité ») et quatre cas où on a un taux Taux=100%.

En résumé, notre algorithme de double renforcement permet d'avoir de meilleures estimations que l'algorithme de renforcement de la base de connaissances seul et met en évidence la pertinence de la fonction de renforcement. Sur les 12 cas d'estimation (estimation de la résilience locale et globale « sécurité » des six équipages) : on a tous les 12 cas où notre algorithme donne de meilleurs résultats soit 100% des cas.

### Scénario 2 : Validation des algorithmes

Pour le scénario 2 et pour les deux cas (renforcement de la base de connaissances, double renforcement), nous résumons également dans le Tableau 17, les calculs d'erreur quadratique moyenne, de taux d'estimation correcte et de la différence d'erreur absolue moyenne relatif à l'estimation de la résilience locale et globale « sécurité » pour chacun des six équipages.

**Tableau 17. Calculs des erreurs absolues moyennes, erreurs quadratiques moyennes, taux d'estimation correcte relatifs à la résilience locale et globale « sécurité » de tous les équipages lors du scénario 2**

<b>SCENARIO 2 : résultats pour la résilience locale</b>				
<b>Equipage</b>	<b><math>\Delta</math>MAE</b>	<b>Taux (%)</b>	<b>MSE (double renforcement)</b>	<b>MSE (renforcement base)</b>
Equipage 1	-0,53	66,67	0,32	1,31
Equipage 2	-0,11	57,14	0,67	0,84
Equipage 3	-0,2	54,54	0,40	0,70
Equipage 4	-0,343	87,5	0,21	0,71
Equipage 5	-0,235	100	0,62	0,82
Equipage 6	-0,636	90	0,11	0,83
<b>Moyenne</b>	<b>-0,343</b>	<b>76</b>	<b>0,39</b>	<b>0,87</b>
<b>SCENARIO 2 : résultats pour la résilience globale</b>				
<b>Equipage</b>	<b><math>\Delta</math>MAE</b>	<b>Taux (%)</b>	<b>MSE (double renforcement)</b>	<b>MSE (renforcement base)</b>
Equipage 1	-0,15	83,33	0,49	0,63
Equipage 2	-0,057	57,14	0,55	0,66
Equipage 3	-0,268	72,73	0,43	0,76
Equipage 4	-0,28	100	0,23	0,55
Equipage 5	-0,116	100	0,07	0,09
Equipage 6	-0,485	100	0,20	0,75
<b>Moyenne</b>	<b>-0,226</b>	<b>85,53</b>	<b>0,33</b>	<b>0,57</b>

On fait le même constat que pour le scénario 1 : dans tous les cas de figures, notre algorithme de double renforcement permet d'avoir de meilleures estimations que l'algorithme de renforcement de la base de connaissances seul et met en évidence la pertinence de la fonction de renforcement. En effet, toutes les erreurs quadratiques moyennes ( $MSE_{\text{double renforcement}}$ ) dans le cas de l'algorithme du double renforcement sont inférieures à celles ( $MSE_{\text{renforcement base}}$ ) du cas avec l'algorithme de renforcement de la base de connaissances; seul. De plus les différences d'erreurs moyennes absolues sont strictement négatives ( $\Delta MAE < 0$ ) et tous les taux d'estimation correcte sont supérieurs à 54,54%. En résumé, Sur les 12 cas d'estimation (estimation de la résilience locale et globale « sécurité » des six équipages) : on a tous les 12 cas où notre algorithme donne de meilleurs résultats soit 100% des cas.

## - Synthèse des résultats d'estimation de la résilience

Nous avons pu confronter les résultats donnés par notre algorithme d'apprentissage par renforcement des paramètres d'estimation aux résultats qu'on aurait sans renforcement. Le renforcement des paramètres d'estimation permet d'avoir de meilleurs résultats d'estimation. Sur le même principe, on constate que l'apprentissage par double renforcement donne également de meilleurs résultats que l'algorithme de renforcement de la base de connaissances.

Les neurones du réseau sont initialisés aléatoirement pour la mise en œuvre de chaque algorithme puisqu'on ne dispose pas de données "experts" sur les indicateurs de résilience. La comparaison de l'algorithme de renforcement des paramètres d'estimation avec les deux autres ne peut se faire directement. Néanmoins, nous procédons à une comparaison relative aux erreurs moyennes absolues (MAE) et aux erreurs quadratiques moyennes (MSE) engendrées par les différents algorithmes. Les valeurs moyennes des erreurs sont résumées dans le Tableau 18.

**Tableau 18. Moyennes des erreurs absolues moyennes et des erreurs quadratiques moyennes relatives à la résilience locale et globale « sécurité » pour les deux scénarios**

	<b>erreurs quadratiques moyennes (MSE)</b>					
	Double renforcement		Renforcement base		Renforcement paramètres	
	Résilience locale	Résilience globale	Résilience locale	Résilience globale	Résilience locale	Résilience globale
Scénario 1	0,40	0,30	1,04	0,99	0,58	0,46
Scénario 2	0,39	0,33	0,87	0,57	0,51	0,74
	<b>erreurs moyennes absolues (MAE)</b>					
Scénario 1	0,50	0,39	0,91	0,78	0,58	0,70
Scénario 2	0,46	0,39	0,81	0,60	0,58	0,48

L'algorithme qui engendre les MSE et les MAE les plus faibles est le plus efficace. Par suite, l'algorithme du renforcement des paramètres d'estimation est plus efficace que celui du renforcement de la base de connaissances (Tableau 18). Et l'algorithme du double renforcement est plus efficace que les deux autres algorithmes (renforcement paramètres d'estimation et renforcement base de connaissances).

Dans le cadre de nos travaux, l'estimation de la résilience locale et globale « sécurité » s'effectue *a posteriori*. Néanmoins, l'objectif à terme est d'effectuer une estimation « en ligne » dans le but de d'évaluer la résilience d'un SHM à un instant donné. Les valeurs maximales et minimales des indicateurs de résilience évalués *a posteriori* nous ont permis de traiter les données pour avoir des indicateurs de résilience compris entre [-1 1] ; ce qui nous a permis de faire les comparaisons entre les valeurs d'indicateurs estimées et celles évaluées *a posteriori*. La section suivante, nous présentons l'évaluation *a posteriori* de la résilience et effectuons une comparaison des résultats des équipages en termes de résilience.

### 3.3. Evaluation a posteriori de la résilience

Sur la base de la définition des critères énoncés dans la section précédente et de la transcription des expérimentations, nous pouvons obtenir les courbes d'évolution des différents critères. Puis en appliquant la méthode d'évaluation de résilience proposée au chapitre 3, nous pouvons évaluer le couple (résilience locale, résilience globale) sur chaque critère et pour chacun des six équipages pour les deux scénarios. A partir de la transcription des expérimentations, nous avons établi le Tableau 19. Nous rapportons les données sur les horaires d'occurrences des conséquences des événements sans précédent annoncés par les équipages.

Parfois, une heure d'annonce n'apparaît pas mais est remplacée par l'indication « inaccessible ». Il s'agit d'événements dont l'occurrence dépendait de décisions antérieures prises par les pilotes. Tous ne pouvaient donc les voir. Parfois, cette heure d'annonce est remplacée par le signe « X » pour indiquer que l'événement sans précédent était bien présent mais n'a pas été perçu.

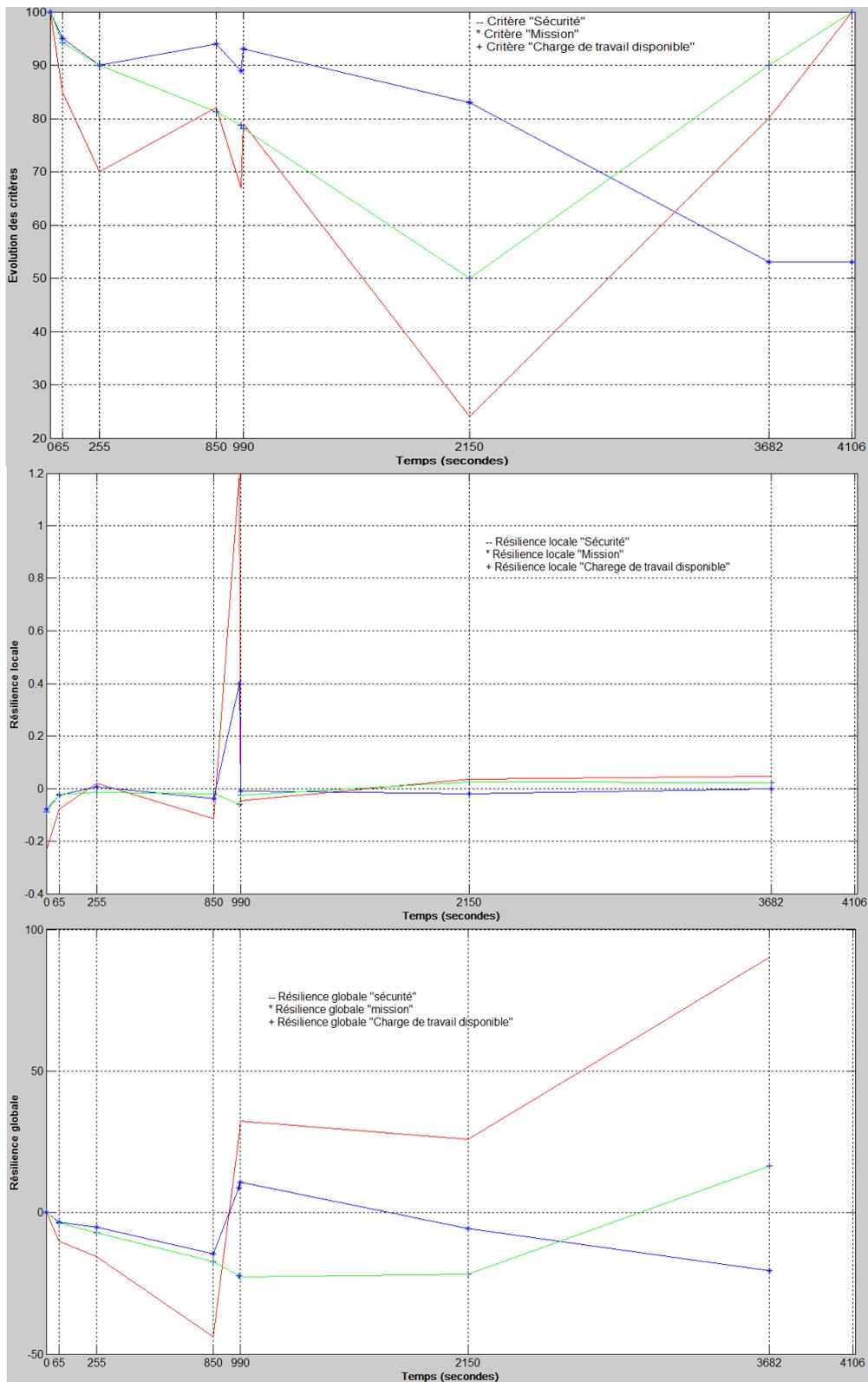
**Tableau 19. Heure de l'annonce des événements sans précédent pour chaque scénario**

SCENARIO 1						
Evènements	Equipage 1	Equipage 2	Equipage 3	Equipage 4	Equipage 5	Equipage 6
1. Puissance supplémentaire requise	inaccessible	X	00:01:05	00:04:50	X	X
2. Décollage long	00:02:00	00:04:00	00:04:15	00:03:45	00:03:45	00:06:00
3. Manche dur	00:02:04	inaccessible	00:16:20	00:09:10	inaccessible	inaccessible
4. Freinage dur	00:54:20	00:51:40	inaccessible	00:56:10	inaccessible	inaccessible
5. Roulage freiné	00:57:24	00:55:15	inaccessible	inaccessible	inaccessible	inaccessible
SCENARIO 2						
1. Givrage vitres	00:00:00	00:00:00	00:00:00	00:00:00	00:00:00	00:00:00
2. Rétro éclairage défaillant	X	00:06:49	X	X	00:04:03	X
3. Odeur brûlé	00:05:50	00:07:48	00:07:39	00:05:15	00:04:44	00:12:50
4. Fumée du TR	00:10:23	00:08:15	00:09:35	00:07:45	00:05:35	00:14:10
5. Commande de pompe carburant en panne	X	X	00:34:14	00:13:55	X	00:20:35
6. Panneau carburant défaillant	00:18:24	00:41:35	00:28:50	00:14:00	00:18:35	00:26:50
7. Fusibles sautés	00:22:50	X	00:33:57	00:39:10	00:13:41	00:51:10
8. Problème Fusible phase C	00:55:40	X	00:37:35	00:41:00	X	00:54:50

A partir de ces horaires mais également des instants de récupération des perturbations par les équipages, de décisions de mise en attente ou de déroutement, on évalue les différents critères, puis la résilience locale et globale associées correspondant à ces instants spécifiques (correspondant aux itérations dans nos processus d'apprentissage).

- **Scénario 1**

Dans le scénario 1, les courbes d'évolution (en %) des trois critères prédéfinis (sécurité, charge de travail disponible et mission) et les résiliences locales et globales associées pour l'équipage 3 sont présentées sur la Figure 43.



**Figure 43. Scénario 1 : courbes d'évolution des critères « Sécurité/Charge de travail disponible/Mission » puis des résiliences locales et globales associées à chacun des critères pour l'équipage 3**

Nous résumons dans le Tableau 20 les évolutions de la résilience locale et globale pour des instants spécifiques correspondant aux instants d'occurrences des conséquences des événements sans précédent (résilience locale négative), aux instants de récupération (résilience locale positive), etc. Cet équipage 3 a la particularité d'avoir pu formuler la bonne hypothèse sur l'origine de toutes les perturbations (problème de frein au niveau des roulements de l'avion). Les résiliences locales et globales « sécurité » à la fin du scénario (t=3682 s) sont donc positives. L'équipage a décidé de se dérouter sur un autre lieu d'atterrissage d'où la résilience locale est nulle et la résilience globale « mission » négative.

**Tableau 20. Evolution de la résilience locale et globale de l'équipage 3 lors du scénario 1**

Temps (s)	0	65	255	850	980	990	2150	3682
rl "sécurité"	-0,23	-0,078	0,0202	-0,115	1,2	-0,047	0,036	0,047
rg "sécurité"	0	-10,06	-15,64	-43,97	26,52	32,28	25,98	90,11
rl "mission"	-0,07	-0,026	0,006	-0,038	0,4	-0,008	-0,019	0
rg "mission"	0	-3,355	-5,216	-14,65	8,841	10,79	-5,559	-20,56
rl "charge de travail disponible"	-0,08	-0,022	-0,014	-0,019	-0,06	-0,024	0,026	0,0236
rg "charge de travail disponible"	0	-3,58	-7,14	-17,2	-22,4	-22,8	-21,7	16,32

Avec rl : résilience locale et rg : résilience globale.

Une classification des différents équipages peut alors être faite notamment par l'intermédiaire des valeurs multicritères de résiliences locales et globales à la fin du scénario 1. Nous résumons dans le Tableau 21 les valeurs finales des indicateurs de résiliences locales et globales des différents équipages pour le scénario 1 et la classification correspondante des équipages. La sécurité est le critère prioritaire du système et l'équipage dont la résilience globale « sécurité » est la plus importante, est le plus résilient.

**Tableau 21. Scénario 1 : classement des équipages en fonction des indicateurs de résiliences locales et globales**

Classement (du plus au moins résilient)	Résilience globale finale			Résilience locale finale		
	sécurité	charge de travail disponible	Mission	sécurité	charge de travail disponible	Mission
Equipage 4	404,02	14,4	-63,35	1,36	0	0
Equipage 3	90,11	16,35	-20,55	0,04	0,02	0
Equipage 6	-77	-26,3	-52	-77	0,04	0
Equipage 1	-135,21	16,59	4,86	-0,15	0,28	0
Equipage 2	-633,35	-642,59	-3,66	-18	-6,4	-41,5
Equipage 5	-718	-708,83	-8,83	-20,02	-10,03	-50,03

Nous établissons le classement en termes de résilience des équipages comme suit, du plus résilient au moins résilient, on a équipage 4-3-6-1-2-5. Ce classement fera l'objet d'une comparaison avec celui obtenu au cours du projet REACT.

## - Scénario 2

Sur la Figure 44, nous présentons les courbes d'évolution (en %) des trois critères prédéfinis (sécurité, charge de travail disponible et mission) pour l'équipage 1. En dérivant chacun de ces critères, on obtient les résiliences locales « Sécurité », « charge de travail disponible » et « mission ». L'évaluation des résiliences globales (« Sécurité », « charge de travail disponible » et « mission ») correspond au calcul des intégrales des résiliences locales.

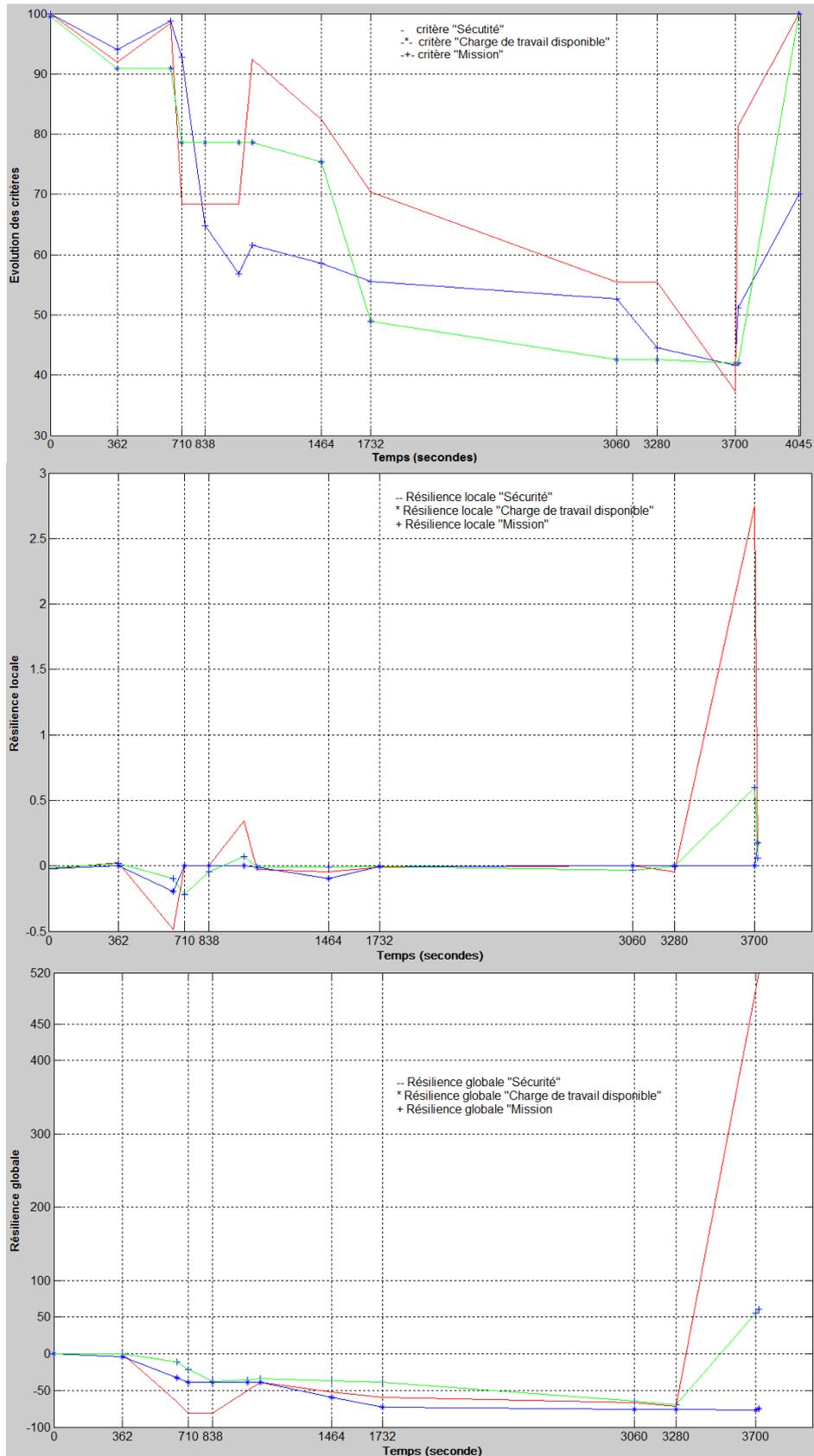


Figure 44. Scénario 2 : courbes d'évolution des critères « Sécurité/Charge de travail disponible/Mission» puis des résiliences locales et globales associées à chaque critère pour l'équipage 1

Pour l'équipage 1, au début du scénario, tous les critères sont à 100%. Des instants spécifiques affectant le SHM, correspondant aux conséquences mesurables des occurrences d'évènements, des actions de récupérations, des décisions de mise en attente ou de déroutement, ont été sélectionnés. En fonction de l'occurrence des évènements sans précédent et de leur détection ou non, le critère « sécurité » évolue; le critère décroît ou décroît selon que des actions de récupération adéquates soient appliquées ou non. Le critère « charge de travail disponible » évolue relativement à la fréquence des actions de l'équipage. Tous ces faits peuvent amener l'équipage à changer ou ne plus respecter la mission préétablie.

Nous résumons dans le Tableau 22 les évolutions de la résilience locale et globale pour des instants spécifiques sur le même que précédemment. Pour ce scénario, l'équipage 1 détecte à t=3340s l'origine de toutes les perturbations (la phase C de la génératrice 1), l'équipage applique des actions de récupération. Les critères « sécurité » et « charge de travail disponible » augmentent (tendant vers 100%). Par contre, l'équipage décide de se dérouter vers un autre lieu d'atterrissage, d'où le critère « mission » est pénalisé à 70%. Par suite les résiliences locales et globales « sécurité » notamment deviennent positives caractérisant le gain en résilience du système.

**Tableau 22. Evolution de la résilience locale et globale de l'équipage 1 lors du scénario 2**

Temps (s)	rl sécurité	rl charge de travail disponible	rl mission	rg sécurité	rg charge de travail disponible	rg mission
0	-0,0221	-0,0238	-0,0166	0	0	0
362	0,0224	0	0,0168	0,0503	-4,3	0,0378
648	-0,4839	-0,1984	-0,0968	-65,9432	-32,6694	-11,4009
710	0	0	-0,2188	-80,9432	-38,8194	-21,1822
838	0	0	-0,044	-80,9432	-38,8194	-37,9954
1020	0,3429	0	0,0686	-49,7432	-38,8194	-35,7554
1090	-0,0267	-0,0086	-0,008	-38,679	-39,1188	-33,6361
1464	-0,0448	-0,0985	-0,0112	-52,0522	-59,1397	-37,2294
1732	-0,0113	-0,0048	-0,0023	-59,5657	-72,9855	-39,0321
3060	0	0	-0,0364	-67,0657	-76,1855	-64,6776
3280	-0,0429	-0,0014	-0,0071	-71,78	-76,3426	-69,4633
3700	2,75	0	0,6	496,72	-76,6426	55,0367
3716	0,0565	0,1763	0,0571	519,1723	-75,2323	60,2938

Une classification globale des différents équipages peut également être faite notamment par l'intermédiaire des valeurs multicritères de résiliences locales et globales à la fin du scénario. Nous résumons dans le Tableau 23 les valeurs finales des indicateurs de résiliences locales et globales des différents équipages pour le scénario 2. Nous établissons le classement en termes de résilience des équipages ; du plus résilient au moins résilient, on a les équipages 1-4-3-6-2-5. Ce classement fera l'objet d'une comparaison avec celui obtenu au cours du projet REACT.

Tableau 23. Scénario 2 : classement des équipages en fonction des indicateurs de résiliences locales et globales

Classement (du plus au moins résilient)	Résilience globale finale			Résilience locale finale		
	sécurité	charge de travail disponible	Mission	sécurité	charge de travail disponible	Mission
Equipage 1	519,1723	-75,2323	60,2938	0,0565	0,1763	0,0571
Equipage 4	79,0813	7,1505	8,877	0,3882	-0,1012	0,0847
Equipage 3	28,0081	-14,4894	-93,327	0,2044	-0,0934	0,1143
Equipage 6	-61,3668	-4,0047	2,378	0,904	-0,312	0,912
Equipage 2	-50,8045	-91,3433	-62,139	-0,0665	-0,0809	-0,0613
Equipage 5	-97,1616	35,7659	-52,727	-0,0237	0,0031	-0,0355

Les données de notre étude sont issues de la campagne expérimentale menée dans le cadre du projet REI-REACT. Une démarche de réaction aux événements imprévus a été formalisée et expérimentée lors la campagne expérimentale. Dans la section suivante, nous présentons brièvement la démarche REACT puis comparons nos résultats (estimation, classement des équipages en termes de résilience, etc.) aux résultats de l'étude de la démarche du projet.

### 3.4. Liens entre la classification des équipages et les résultats de REACT

La démarche REACT a été formalisée et déclinée sous la forme d'une méthode de raisonnement critique devant aider un collectif à réagir à des événements imprévus difficilement compréhensibles et porteurs de risque. Dans la Figure 23, sont regroupés les six principes guidant la démarche REACT ; le principe 1 correspond au point 1 sur la figure, le principe 2 au point 2, etc.

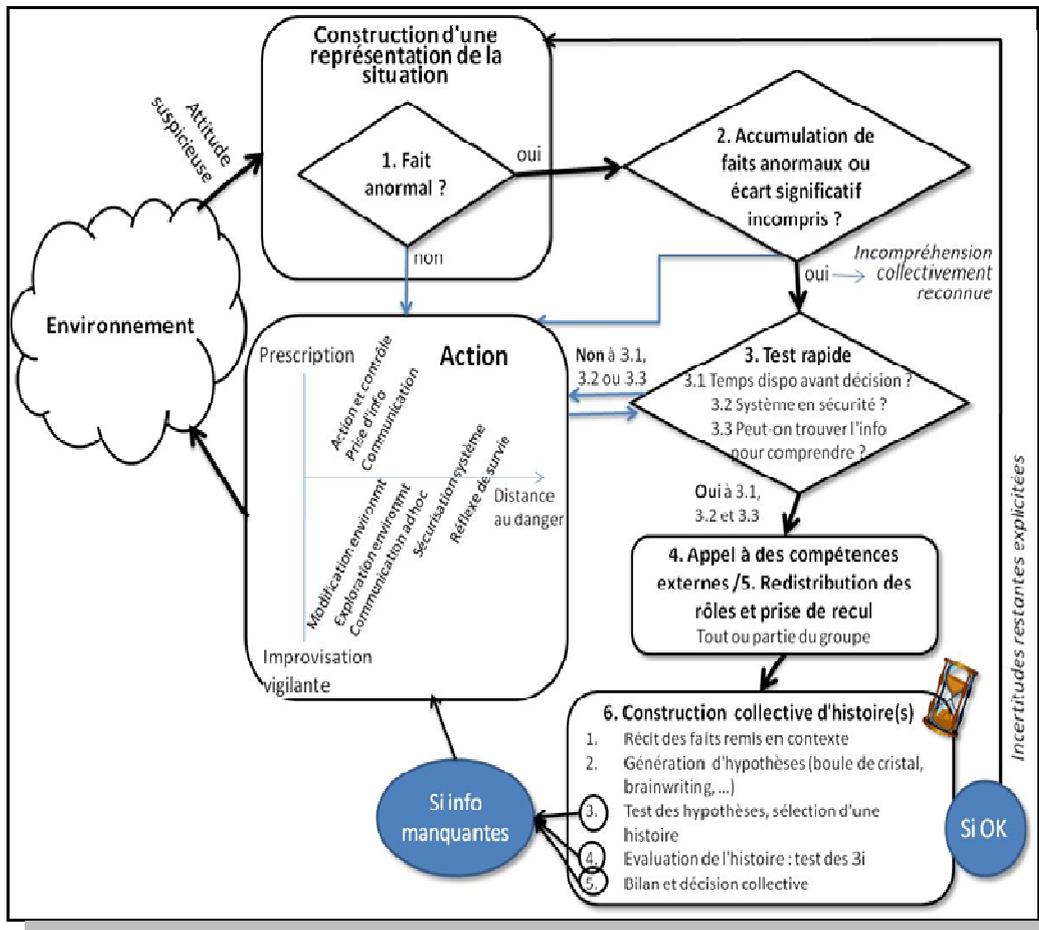


Figure 45. Principes guidant la démarche REACT [Karsenty *et al.*, 2011]

Une analyse de nombreux incidents et accidents dans les domaines à risque, tels que l'incident nucléaire de «Three Mile Island», l'accident de la navette Columbia, la collision ferroviaire de «Zoufftgen», a permis de mettre en évidence certaines exigences ou principes que la méthode REACT (Figure 45) ambitionne d'y répondre [Karsenty *et al.*, 2010 ; Quillaud *et al.*, 2010]:

*Principe 1 : Vigilance collective face aux faits anormaux*

Chaque acteur devrait adopter une attitude suspicieuse vis-à-vis de la situation éventuellement porteuse de danger. Cette vigilance élevée devrait permettre de détecter les écarts ou les prémises de faits anormaux.

*Principe 2 : Reconnaître qu'on ne comprend plus*

L'accumulation des faits anormaux observés ou des écarts significatifs incompris doit conduire le collectif à reconnaître qu'il ne comprend pas la situation et de décider d'appliquer le principe suivant de la démarche (test rapide).

*Principe 3 : Test rapide*

Les opérateurs doivent réaliser un test rapide pour sortir de l'état d'incompréhension reconnu : pas de danger immédiat? Le système est en sécurité? Les informations pour comprendre la situation sont-elles accessibles?

*Principe 4 : Appel à des compétences externes*

Le but est d'étendre la compétence disponible avec des acteurs extérieurs fiables et mobilisables rapidement.

*Principe 5 : Prise de recul*

Les opérateurs devraient, en tout ou partie, se détacher volontairement de la situation actuelle. Ils devraient donc se mettre en retrait, cela évite les réactions spontanées porteuses de risques.

*Principe 6 : Construction collective d'une histoire argumentée*

Si le test rapide est concluant, le collectif disposerait alors de temps pour émettre des hypothèses, construire des histoires expliquant la situation et permettant d'en déduire les réactions possibles et les actions à entreprendre.

La démarche a été expérimentée lors de la campagne expérimentale. L'évaluation de la démarche a consisté à comparer les performances de collectifs ayant suivi les principes de la démarche REACT avec celles de collectifs ne l'ayant pas suivi. L'analyse des hypothèses retenues et des décisions prises par les équipages formés ou non à la démarche REACT a été menée [Karsenty *et al.*, 2011]. A cet effet, les verbalisations des équipages ont été analysées afin d'évaluer :

- la proximité de leurs hypothèses par rapport à la réalité des faits. Les hypothèses retenues par chaque équipage ont alors été classées selon le schéma général suivant : *éloignée- proche- exacte;*
- et surtout la qualité des décisions prises par les différents équipages. Les décisions ont été classées selon en catégories de la façon suivante :
  - Pas d'action : l'équipage ne prend aucune décision particulière en réaction à un événement imprévu.
  - Conséquences atténuées : l'équipage ne modifie pas sa mission et prend uniquement une décision consistant à prévoir un moyen d'atténuer les conséquences si un incident devait se produire.
  - Problème atténué : l'équipage prend une (ou des) décision(s) visant à minimiser les risques d'incident sans pour autant avoir isolé ou résolu la source du problème.

- Problème isolé : l'équipage a identifié précisément la cause de l'événement (des événements) imprévu(s) et l'a isolé pour éviter qu'elle ne nuise à la poursuite du vol.
- Problème résolu : l'équipage a compris la source des faits anormaux constatés et a agi dessus pour retrouver une situation normale.

L'évaluation des principes de la démarche REACT développée dans le projet REI-REACT a été menée.

- **Scénario 1**

Les résultats obtenus sont représentés dans le Tableau 24. On constate que les équipages qui ont trouvé les hypothèses les plus exactes sont ceux qui ont appliqué les principes recommandés dans la démarche REACT ou suivi des pratiques similaires. Il s'agit notamment des équipages 3, 4 et 6. Les autres équipages ont retenu des hypothèses éloignées de la réalité et les décisions prises n'ont servi qu'à atténuer les conséquences d'un incident éventuel. L'équipage 5 n'a pris aucune décision.

**Tableau 24. Résultats de l'analyse de la démarche REACT pour le scénario 1**

Scénario 1	Equipage	Principes de la méthode appliqués									Hypothèse retenue
		Annonce faits anormaux	Incompréhension reconnue explicitement	Test rapide évaluation danger	Demande d'aide externe	Distribution tâches	Analyse collective	Résumé des faits	Génération d'hypothèses	Test d'hypothèse	
REACT	EQ1										Eloignée
	EQ2										Eloignée
	EQ3										Exacte
Sans REACT	EQ4										Proche
	EQ5										Eloignée
	EQ6										Proche

Scénario 1	Equipage	Principes de la méthode appliqués									Décision
		Annonce faits anormaux	Incompréhension reconnue explicitement	Test rapide évaluation	Demande d'aide externe	Distribution tâches	Analyse collective	Résumé des faits	Génération groupée d'hypothèses	Test d'hypothèse	
REACT	EQ1										Conséquences atténuées
	EQ2										Conséquences atténuées
	EQ3										Problème isolé
Sans REACT	EQ4										Problème atténué
	EQ5										Pas d'actions
	EQ6										Problème atténué

	Application des recommandations de la démarche
	Autre pratique appliquée
	Phase non traitée

Nous vérifions que les équipages les plus résilients sont ceux qui ont retenus les hypothèses les plus exactes et pris les décisions adéquates face aux événements sans précédent. La comparaison de notre classification des équipages en termes de résilience (Tableau 21) avec l'évaluation de la démarche REACT (Tableau 24) est résumée dans le Tableau 25.

**Tableau 25. Comparaison du classement des équipages en termes de résilience et des résultats de la démarche REACT**

Classement des équipages (du plus au moins résilient)	Résultats Démarche REACT	
	Hypothèse retenue	Décision prise
Equipage 4	Proche	Problème atténué
Equipage 3	Exacte	Problème isolé
Equipage 6	Proche	Problème atténué
Equipage 1	Eloignée	Conséquences atténuées
Equipage 2	Eloignée	Conséquences atténuées
Equipage 5	Eloignée	Pas d'action

On constate bien que dans l'ordre, les équipages 4, 3 et 6 qui ont appliqué les principes de la méthode REACT ou des principes similaires, sont les plus résilients dans notre classement (Tableau 21). Suivent dans l'ordre, les équipages 1 et 2 qui n'ont appliqué que peu de principes REACT. Et enfin, l'équipage 5 qui n'a appliqué par ailleurs aucune actions de récupération.

- **Scénario 2**

Pour le scénario2, les résultats obtenus sont représentés dans le Tableau 26. On constate que les équipages qui ont appliqué le plus les principes recommandés par la démarche REACT et des principes similaires sont ceux qui ont retenus les hypothèses les plus exactes et pris les meilleures décisions. Il s'agit des équipages 1, 3, 4 et 6.

**Tableau 26. Résultats de l'analyse de la démarche REACT pour le scénario 2**

Scénario 2	Equipage	Principes de la méthode appliqués									Décision
		Annonce faits anormaux	Incompréhension reconnue explicitement	Test rapide évaluation	Demande d'aide externe	Distribution tâches	Analyse collective	Résumé des faits	Génération groupée d'hypothèses	Test d'hypothèse	
REACT	EQ1										Problème atténué
	EQ2										Problème atténué
	EQ3										Problème isolé
Sans REACT	EQ4										Problème résolu
	EQ5										Conséquences atténuées
	EQ6										Problème isolé

Scénario 2	Equipage	Principes de la méthode appliqués									Hypothèse retenue
		Annonce faits anormaux	Incompréhension reconnue explicitement	Test rapide évaluation danger	Demande d'aide externe	Distribution tâches	Analyse collective	Résumé des faits	Génération d'hypothèses	Test d'hypothèse	
REACT	EQ1										Proche
	EQ2										Eloignée
	EQ3										Exacte
Sans REACT	EQ4										Exacte
	EQ5										Proche
	EQ6										Exacte

	Application des recommandations de la démarche
	Autre pratique appliquée
	Phase non traitée

L'équipage 5 est celui qui a appliqué le moins de principes de REACT; même si l'équipage a retenu une hypothèse proche de la réalité, il n'a pu que prendre des décisions pour atténuer les conséquences d'un éventuel incident. L'équipage 2 constitue une exception ; l'équipage a bien suivi les principes de la démarche REACT mais a malheureusement retenu une hypothèse éloignée de la réalité : la décision prise ne permet que de minimiser les risques d'incident. Ce qui met en évidence le lien entre la qualité des hypothèses retenues et la qualité des décisions prises.

La comparaison de notre classification des équipages en termes de résilience (Tableau 23) avec l'évaluation de la démarche REACT (Tableau 26) est résumée dans le Tableau 27. Nous retrouvons bien dans l'ordre nos équipages 1, 4, 3 et 6 parmi les équipages les plus résilients de notre classement (Tableau 23). L'équipage 1 est mieux classé car notre méthode d'évaluation de la résilience locale ou globale prend en compte la notion du temps de réaction et de récupération dans le calcul de la résilience : si deux équipages prennent les mêmes bonnes décisions, le plus rapide sera plus résilient que l'autre. Les équipages 2 et 5 se retrouvent en fin de classement, le premier pour avoir retenu une hypothèse éloignée de réalité et le second pour n'avoir pas du tout appliqué les principes de la démarche REACT.

**Tableau 27. Comparaison du classement des équipages en termes de résilience et des résultats de la démarche REACT**

<b>Classement des équipages en termes de résilience</b>	<b>Résultats Démarche REACT</b>	
	<b>Hypothèse retenue</b>	<b>Décision Prise</b>
Equipage 1	Proche	Problème atténué
Equipage 4	Exacte	Problème résolu
Equipage 3	Exacte	Problème isolé
Equipage 6	Exacte	Problème isolé
Equipage 2	Eloignée	Problème atténué
Equipage 5	Proche	Conséquences atténuées

En résumé, il y a une cohérence entre nos classements des équipages en termes de résilience et les résultats obtenus par l'analyse de la démarche REACT; plus l'hypothèse retenue et la décision prise par l'équipage est proche de la réalité, plus l'équipage est résilient. Les hypothèses retenues et les décisions prises par les équipages reflètent qualitativement les capacités de réaction et de récupération des SHM. Nos indicateurs de résilience locale et de la résilience globale donnent une mesure quantitative des capacités de réaction et de récupération des équipages au cours du temps.

## 4 Conclusion

Une campagne d'expérimentation a été menée dans le cadre du projet REI-REACT financé par la DGA (Direction Générale de l'Armement) ; ce qui nous a permis de mettre en œuvre notre méthode d'évaluation de la résilience d'un SHM en situation critique. Les indicateurs de résilience obtenus sont ensuite exploités dans des processus d'apprentissage sur la base des trois algorithmes proposés dans le chapitre 3.

Nous avons présenté dans un premier temps, le protocole expérimental mis en place dans le cadre du projet. Le projet REI-REACT visant à proposer une démarche de réaction collective face à des événements imprévus, deux scénarios ont été proposés; l'un avec une charge de travail et une pression temporelle élevées et l'autre avec une charge de travail et une pression temporelle faibles.

Nous avons ensuite retenu et défini trois critères à partir desquels notre méthode d'évaluation multicritères de la résilience locale et globale des différents équipages a été mise en œuvre. Les indicateurs sont exploités dans la mise en œuvre de nos algorithmes d'estimation par apprentissage renforcé. En effet, au vu de la définition des critères pour l'évaluation de l'état d'un SHM en termes de résilience, le critère « sécurité » lié aux instants d'occurrence des perturbations sur le système ne peut être mesuré "en ligne". Trois algorithmes ont été proposés et mis en œuvre par l'intermédiaire d'un outil d'estimation développé en C++. Il en ressort que le renforcement des paramètres d'estimation ou de la base de connaissance, et surtout leur association pour le double renforcement, permet d'améliorer l'efficacité et la qualité de l'estimation des valeurs de résilience non mesurables en ligne.

Par suite, les équipages ont été classés en termes de résilience pour chacun des deux scénarios. La comparaison avec les résultats obtenus par l'analyse de l'application des principes de la démarche REACT, met en évidence la pertinence de notre couple d'indicateurs de la résilience locale et globale, en ce sens que ces indicateurs permettent de quantifier les capacités de réaction et de récupération au cours du temps des SHM en situation critique.

Ces résultats apportent des réponses satisfaisantes au besoin de mesure de la résilience dans le contexte des SHM faisant face à des événements sans précédent et au besoin de compréhension des situations critiques. Des perspectives de recherches peuvent être émises notamment pour l'enrichissement des algorithmes pour prédire les valeurs de résilience mesurables ou non en ligne. Une autre perspective est l'application de la méthode d'évaluation multicritères de la résilience dans le cadre d'événements rares ou improbables où des données d'expert peuvent servir de base aux études.



---

## Chapitre 5. Perspectives

---

Chapitre 5. Perspectives .....	117
1 Introduction .....	118
2 Vers un outil d'aide à l'action.....	119
2.1 Vers une prédiction en ligne des indicateurs de résilience.....	119
2.2 Outil d'aide à l'action .....	120
2.3 Exemple de mise en œuvre de la méthode AHP.....	121
3 Application à d'autres types situations .....	125
4 Conclusion .....	127

## 1 Introduction

Les algorithmes d'apprentissage renforcé notamment celui du double renforcement, ont permis d'estimer les indicateurs de résilience d'un SHM face à des situations critiques. En outre, la méthode de calcul de la résilience multicritères locale et globale permet de quantifier et caractériser l'état du SHM. Les résultats de l'étude expérimentale ont montré l'intérêt de l'apprentissage renforcé pour l'évaluation de la résilience multicritères du SHM dans le contexte des événements sans précédents. L'étude a été effectuée *a posteriori*, l'objectif est néanmoins de pouvoir constituer un système d'aide à l'opérateur humain en temps réel pour mieux faire face aux situations critiques. Dans ce dernier chapitre, nous abordons quelques perspectives de recherche relatives à nos travaux.

Dans la première partie de ce chapitre, nous nous concentrons sur la perspective de développement d'un outil d'aide à l'action basé sur l'évolution de l'état du SHM en termes de résilience. Le principe de base repose sur le fait que le SHM est plongé au sein d'un environnement dynamique perturbé, les opérateurs humains doivent prendre des décisions adéquates en fonction de l'état courant et son évolution future pour faire face aux occurrences de situations critiques. Le but est de réagir et de récupérer positivement de ces événements sans précédent. Ce principe est analogue au paradigme de l'apprentissage par renforcement (*reinforcement learning*) où l'agent apprenant cherche, au travers d'expérience itérées, la stratégie d'action optimale en maximisant le signal « récompense » issu de son environnement proche au cours du temps. Le SHM apprend et en fonction des prédictions des évolutions de son état en termes de résilience multicritère, anticipe et applique les actions qu'il convient de faire en diverses situations. Cette perspective s'oriente vers :

- Le développement de systèmes de prédiction de l'évolution de l'état du SHM en termes d'indicateurs de résilience. Il s'agit de prédire les valeurs de résilience mesurables ou non "en ligne" ;
- La prise en compte dans la prédiction de la notion de "récompense" adaptée et exprimée en termes de Bénéfices/Coûts/Déficits potentiels (modèle BCD du laboratoire) sur les indicateurs de résilience ;
- Le développement d'une méthode d'aide à l'action basée sur les indicateurs de résilience.

Dans la deuxième partie de ce chapitre, nous discutons des perspectives d'étude de l'évaluation de la résilience multicritère, de la mise œuvre de nos algorithmes ainsi que des différentes perspectives de recherche dans le cadre d'événements rares ou improbables où des données « expertes » peuvent servir de base aux études.

## 2 Vers un outil d'aide à l'action

A court terme, nous envisageons l'amélioration des algorithmes de renforcement proposés. En effet, les différents renforcements sont basés sur le calcul d'une fonction d'erreur de renforcement  $f(\varepsilon_{[i]}) = -\varepsilon_{[i]}$ . Le renforcement se fait en prenant en compte l'erreur d'estimation issue de l'itération précédente (équation 27). La première amélioration serait de pondérer cette fonction d'erreur par un facteur ( $\eta$ ) décroissant (ou croissant) au cours des itérations. La fonction d'erreur de renforcement est alors donnée par l'équation 43 :

$$f(\varepsilon_{[i]}) = -\eta \times \varepsilon_{[i]} \quad (43)$$

avec  $\eta = 1 - [\text{itération} / (\text{nombre total d'itérations})]$

La deuxième amélioration de nos algorithmes, serait de prendre en compte toutes les erreurs issues des itérations précédentes dans la définition de la fonction de renforcement. La fonction d'erreur de renforcement est alors donnée par l'équation 44 :

$$f(\varepsilon_{[i]}) = -\eta \times (\varepsilon_{[0]} + \varepsilon_{[1]} + \dots + \varepsilon_{[i]}) \quad (44)$$

Les résultats obtenus avec les nouvelles méthodes de calcul de l'erreur de renforcement seront alors comparés aux résultats de l'estimation de nos algorithmes, en particulier l'algorithme du double renforcement.

### 2.1 Vers une prédiction en ligne des indicateurs de résilience

La prédiction des indicateurs de résilience relatifs à l'état du SHM dans l'analyse des risques, peut permettre aux opérateurs d'anticiper et prendre les décisions adéquates sur la base de l'évolution de l'état du SHM ; ce qui permettrait de limiter les conséquences des événements redoutés. Cette prédiction en ligne peut être assurée par un système embarqué qui :

- calcule les critères (à définir selon le SHM considéré) à partir des données dynamiques du SHM et de son environnement ;
- se base sur notre outil pour estimer "en ligne" les indicateurs de résilience non mesurables directement ;
- prédit l'évolution de l'état du SHM en termes d'indicateurs de résilience ;
- sur la base des prédictions, préconise le comportement de l'opérateur humain le mieux adapté à la situation courante sur la base d'une analyse de la prise de décision multicritères.

De nombreux outils de prédiction existent et ont été largement éprouvés notamment les réseaux de neurones. La capacité des réseaux de neurone à apprendre des exemples donnés (ou base d'apprentissage) en font des outils très utilisés car il n'y a pas besoin de modéliser mathématiquement chaque cas. Les réseaux de neurones ont été utilisés avec succès pour résoudre de nombreux problèmes d'ingénierie dans divers domaines allant de la prédiction financière, prédiction de consommation (d'eau, d'électricité, etc.) à la prédiction de trafic. Au sein de l'équipe Systèmes Homme-Machine du LAMIH, deux méthodes de prédiction des erreurs humaines et en particulier des franchissements de barrière ont par ailleurs été établies. La première méthode se base sur le Raisonnement à Partir de Cas distribué [Polet *et al.*, 2012] et la deuxième méthode se base sur le réseau de neurones [Zhang, 04]. Les prédictions ont été faites à partir du modèle Bénéfices/Coûts/Déficits potentiels (modèle BCD). On peut par la suite envisager la prise en compte dans la prédiction de la notion de "récompense" adaptée et exprimée en termes de Bénéfices/Coûts/Déficits potentiels sur les indicateurs de résilience. Le modèle BCD (Bénéfice-Coût-Déficit) est un modèle qui permet d'évaluer les conséquences d'un comportement dévié relatif à un franchissement de barrières par rapport à un comportement prescrit [Polet *et al.*, 2002; 2009 ; Vanderhaegen, 2004]. Il

s'agit dans notre cas d'interpréter le comportement des opérateurs humains face à une situation critique en termes de :

- Bénéfices : espérés en relation avec la maîtrise de la situation critique. Le but est d'avoir un bénéfice en termes de gain de temps, de diminution de charge de travail, par exemple,
- Coûts : acceptables suite aux actions des opérateurs. L'action d'un opérateur peut entraîner une modification de la structure du système et/ou du mode opératoire,
- Déficits potentiels : si les actions des opérateurs mènent à des situations potentiellement dangereuses, ce qui conduit à un déficit potentiel lié au risque associé.

Par la suite, les données issues du modèle BCD peuvent permettre de définir un indicateur multicritère pertinent pour la caractérisation de la notion de "récompense" pour notre outil d'aide à l'action.

## **2.2 Outil d'aide à l'action**

L'occurrence d'un fait nouveau au niveau du SHM engendre un nouveau choix éventuel; il s'agira de prévoir ce qui va se passer (prédiction des indicateurs de résilience) dans le but d'anticiper les conséquences possibles et d'envisager les options d'actions à effectuer. La prédiction des indicateurs de résilience locale et globale permet d'anticiper l'évolution de l'état du SHM. L'objectif serait de permettre aux opérateurs de prendre les mesures préventives en appliquant les plans d'actions adéquats. L'outil d'aide à l'action devrait donc consister en une méthode et/ou des calculs permettant de choisir l'alternative de plan d'actions optimale parmi un ensemble de solutions possibles. Le choix de la meilleure alternative dépendra des critères (les critères d'évaluation du SHM) et des sous-critères (les indicateurs de résilience locale et globale) identifiés, qui influencent la prise de décision. Cet outil d'aide à l'action est relatif à une aide à la décision multicritère. Il faut :

- recueillir les informations subjectives relatives à l'état du SHM : tous les critères n'ont pas la même importance; il s'agit donc de les pondérer au préalable pour une utilisation "en ligne".
- recueillir les informations objectives relatives à l'état du SHM : valeurs des indicateurs de résilience "en ligne".
- élaborer les plans d'actions et leurs variantes afin de faire face aux perturbations éventuelles, basé sur les critères et les sous-critères priorisés.
- évaluer les avantages et les inconvénients des plans d'actions par rapport aux critères et sous-critères préalablement établis.

De nombreuses méthodes d'aide à la décision multicritère sont proposées dans la littérature. Le choix de la bonne méthode n'est alors pas évident d'autant qu'il n'y a pas de méthode parfaite ; néanmoins, le processus d'analyse hiérarchique (en anglais, *Analytic Hierarchy Process (AHP)*), [Saaty, 2008] est la méthode d'aide à la décision multicritère qui sera adoptée pour sa capacité à prendre en compte les critères et les sous-critères subjectifs et/ou objectifs, ainsi qu'à la possibilité de considérer l'interdépendance des critères. La structure hiérarchique de cette méthode permet l'exploitation des critères d'évaluation de l'état du SHM et des indicateurs de résilience locale et globale qui en découlent. Les critères d'évaluation du SHM peuvent être contradictoires ou encore dépendantes : d'où le besoin de définir des sous-critères objectifs, en l'occurrence les indicateurs de résilience locale et globale. Les indicateurs de résilience permettent d'avoir une vue de la variation locale et globale des critères d'évaluation du SHM.

### 2.3 Exemple de mise en œuvre de la méthode AHP

La Figure 46 présente la première étape de la démarche de l’AHP pour une analyse hiérarchique. Dans un premier temps, il faut identifier les objectifs ou les buts, les critères et les sous-critères (indicateurs de résilience), et alternatives de plans d’actions. Dans l’exemple de la Figure 46, la méthode AHP a permis de décomposer le problème, dont le but est de « choisir le plan d’action le plus résilient » selon l’arborescence hiérarchique des différents critères de résilience que sont la sécurité, la charge de travail, la qualité de service. Ces critères sont divisés en sous-critères qui correspondent aux indicateurs de résilience locale et globale. Les plans d’actions sont relatifs aux différentes alternatives possibles pour la réalisation d’une tâche.

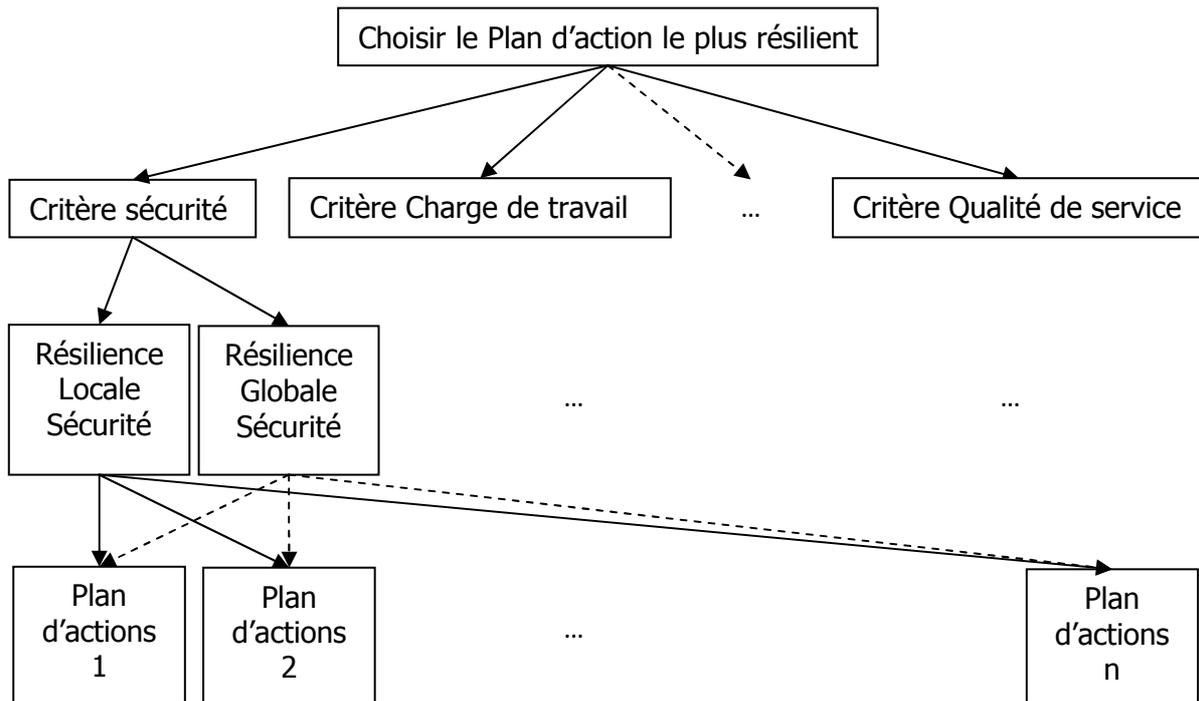


Figure 46. Exemple de Processus Hiérarchique d'Analyse pour une aide à la décision multicritères

Cette méthode permet une représentation hiérarchique aisée des problèmes multicritères puisque chaque catégorie de données (but, critères, sous-critères, alternatives) constitue chacune un niveau. Un processus est constitué au minimum de trois niveaux. Les étapes suivantes de cette méthode consistent à comparer quantitativement des éléments d'un niveau avec les éléments du niveau supérieur notamment les critères entre eux, deux à deux, à l'aide d'une échelle de pondération afin de mettre en lumière la solution optimale répondant le mieux aux critères de décision. Les étapes d'application de la méthode AHP sont les suivantes :

1. Etablir une hiérarchie par comparaison des critères deux à deux selon une échelle qualitative de priorité de 1 à 9,
2. Déterminer le poids ou l'importance relative des critères et des sous-critères s'il y a lieu,
3. Comparer en déterminant le poids de chacune des alternatives pour chacun des critères ou des sous-critères s'il y a lieu;
4. Déterminer l'importance des alternatives par rapport à l'ensemble des critères.

La 1<sup>ère</sup> étape d'application de la méthode AHP est l'établissement d'une hiérarchie par comparaisons binaires des critères, des sous-critères et des alternatives retenus. La comparaison peut être donc faite sur des critères subjectifs ou qualitatifs en transformant le degré de préférence des critères en valeurs de pondération, ou sur des critères objectifs ou quantitatifs, en exprimant au vu de leurs valeurs, le niveau de priorité entre ces critères.

Cette comparaison binaire se base sur une échelle de pondération dont les valeurs sont consignées dans le Tableau 28. Cette pondération quantitative permet d'exprimer l'importance relative d'un critère par rapport à un autre.

**Tableau 28. Echelle des valeurs de pondération pour la comparaison binaire des critères**

<b>Pondération (ou priorité)</b>	<b>Degré de préférence (comparaison qualitative)</b>
1	Même ordre de grandeur des 2 critères
3	Le critère est modérément plus important que l'autre
5	Le critère est plus important que l'autre
7	Le critère est très beaucoup plus important que l'autre
9	Le critère est nettement plus important que l'autre
Les valeurs de pondération paires 2, 4 et 6 peuvent compléter cette échelle pour nuancer les jugements de préférence.	

La mise en œuvre de la pondération à partir de notre exemple de la Figure 46, consiste à comparer d'abord par les éléments du 1<sup>er</sup> niveau en l'occurrence les critères d'évaluation du SHM ; les trois critères (sécurité, charge de travail, qualité de service) sont donc comparés deux à deux au moyen de l'échelle de préférence illustrée dans le Tableau 28. Le résultat des comparaisons relatives des critères ainsi obtenu, est illustré dans le Tableau 29.

**Tableau 29. Exemple de comparaison binaire des critères d'évaluation d'un SHM**

	<b>Sécurité (S)</b>	<b>Charge de travail (Ct)</b>	<b>Qualité de service (Qs)</b>
<b>Sécurité</b>	1	7	9
<b>Charge de travail</b>	1/7	1	5
<b>Qualité de service</b>	1/9	1/5	1

Ce résultat de comparaison binaire sous forme de matrice peut correspondre au jugement d'un expert du domaine d'étude qui privilégie certains critères par leur classement. Sur la base de l'importance relative des critères et des sous-critères, les matrices de comparaison devront permettre de classer et de privilégier certaines alternatives en fonction de situations particulières du SHM.

La seconde étape d'application de la méthode AHP consiste à calculer à partir de la matrice de comparaison, l'importance relative ou la contribution de chaque critère par rapport au but visé : choisir le plan d'action le plus résilient. Cette contribution est calculée par une approximation du vecteur propre « dite normalisée à 1 » de la matrice de comparaison. Une des méthodes de calcul de ce vecteur propre ou vecteur de priorité des critères, est la suivante :

- effectuer la somme de chaque colonne de la matrice
- diviser chaque élément de la matrice par la somme de la colonne correspondante
- additionner chaque rangée (ou ligne) pour faire un vecteur
- diviser ce vecteur par le nombre total d'éléments.

Le vecteur de priorité obtenu donne l'importance de chaque critère dans le choix d'une alternative de plan d'actions pour réaliser le but fixé. Les tableaux de la Figure 47 présente un exemple de calcul du vecteur de priorité des critères.

	S	Ct	Qs		S	Ct	Qs
S	1	7	9		<b>0,8</b>	<b>0,85</b>	<b>0,6</b>
Ct	1/7	1	5	Ct	<b>0,11</b>	<b>0,12</b>	<b>0,33</b>
Qs	1/9	1/5	1	Qs	<b>0,09</b>	<b>0,03</b>	<b>0,07</b>
	<b>1,25</b>	<b>8,2</b>	<b>15</b>		1	1	1
<b>a. Somme de chaque colonne</b>				<b>b. Diviser chaque élément Par la somme de la colonne</b>			

Somme des rangées	<b>d. Somme des rangées Divisée par quantité D'éléments</b>
<b>2,25</b>	
<b>0,56</b>	<b>0,75</b>
<b>0,19</b>	<b>0,19</b>
<b>c. Vecteur propre</b>	<b>0,06</b>
	Vecteur propre Normalisé = 1

Figure 47. Exemple de calcul du vecteur de priorité des critères du SHM

Le vecteur propre approximé  $\begin{bmatrix} \text{Sécurité} \\ \text{Charge de travail} \\ \text{Qualité de service} \end{bmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 0,75 \\ 0,19 \\ 0,06 \end{pmatrix}$  nous indique que le critère

sécurité est le plus important et contribue à 75% dans le choix d'une alternative de plan d'actions; la charge de travail contribue à 19% tandis que la qualité de service n'en est qu'à 6% dans le choix.

Cette procédure de la seconde étape est également appliquée aux niveaux inférieurs de la hiérarchie s'il y a lieu. Dans notre exemple de la Figure 46, on calcule un vecteur de priorité pour les sous-critères (indicateurs de résilience local et global) par rapport à chaque critère respectivement la sécurité, la charge de travail ainsi que pour la qualité de service. Pour le critère de la sécurité par exemple, la comparaison des sous-critères indicateurs de résilience locale et globale permettra d'obtenir l'importance relative accordée à l'un et à l'autre sur la base de sécurité du SHM. La matrice de comparaison relative aux sous-critères respectivement, la résilience locale et la résilience globale (comparaison de leurs valeurs) peut être illustrée par le Tableau 30.

Tableau 30. Exemple de comparaison binaire des sous-critères indicateurs de résilience locale et globale

	Résilience locale	Résilience globale
Résilience locale	1	3
Résilience globale	1/3	1

Le vecteur de priorité associé à la matrice du Tableau 30, est le suivant :  $\begin{bmatrix} \text{Résilience locale} \\ \text{Résilience globale} \end{bmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 0,75 \\ 0,25 \end{pmatrix}$ . La résilience locale est prioritaire et représente 75% de l'évaluation du critère de sécurité du SHM.

La troisième étape de la méthode AHP consiste à comparer les alternatives de plans d'actions en fonction des sous-critères (ou des critères s'il y a lieu, notamment s'ils n'ont pas été décomposés en sous-critères) correspondant au niveau hiérarchique juste au dessus du niveau des plans d'actions. Les alternatives de plans d'actions vont donc être comparées en fonction des indicateurs de résilience locale et globale. Cette comparaison devra exprimer l'apport de chacun des plans d'actions à la résilience locale d'une part, et à la résilience globale d'autre part. Si par exemple pour la contribution à la résilience locale du SHM, on a quatre alternatives de plans d'actions possibles, la matrice de comparaison binaire de ces 4 alternatives en termes de résilience locale correspondante est la suivante :

$$\begin{pmatrix} 1 & 2 & 5 & 1 \\ 1/2 & 1 & 3 & 2 \\ 1/5 & 1/3 & 1 & 1/4 \\ 1/5 & 1/3 & 1 & 1/4 \\ 1 & 1/2 & 4 & 1 \end{pmatrix} . \text{ Le calcul du vecteur de priorité de cette matrice par la méthode } \\ \text{évoquée précédemment donne : } \begin{pmatrix} 0,379 \\ 0,290 \\ 0,074 \\ 0,257 \end{pmatrix} . \text{ Ainsi l'alternative n}^\circ 1 \text{ contribue à près de 38\% à}$$

la résilience locale du SHM, 29% pour l'alternative n°2, etc.

La méthode AHP permet de combiner les deux informations qualitatives et quantitatives; si par exemple on avait les informations quantifiées de chaque alternative en termes de résilience locale, en normalisant ces valeurs à 1, on obtiendrait directement le vecteur de priorité de ces critères. Le principe est le suivant :

$$\begin{bmatrix} \text{alternative n}^\circ 1 \\ \text{alternative n}^\circ 2 \\ \text{alternative n}^\circ 3 \\ \text{alternative n}^\circ 4 \end{bmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 34 \\ 27 \\ 24 \\ 28 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 34/(34+27+24+28) \\ 27/(34+27+24+28) \\ 24/(34+27+24+28) \\ 28/(34+27+24+28) \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 0,301 \\ 0,239 \\ 0,212 \\ 0,248 \end{pmatrix}$$

La dernière étape consiste à sélectionner la meilleure alternative de plans d'actions par rapport à l'ensemble des critères et des sous-critères à partir des différentes matrice composées des vecteurs de priorité calculés.

$$\sum (\text{Pondération critères}) * (\text{Pondération sous critères}) * (\text{Pondération alternatives})$$

Les pondérations étant obtenues par concaténation des vecteurs de priorité des critères, des sous-critères et des alternatives. L'alternative de plan d'action ayant le plus grand poids après le calcul est l'alternative gagnante ou optimale.

Cet exemple de mise en œuvre de la méthode AHP pour l'aide à la décision a été effectué par des calculs *a posteriori*. Pour une utilisation "en ligne", ces calculs pourraient être faits par l'intermédiaire du logiciel "expertchoice" dédié à cette méthode AHP pour constituer une aide à l'action "en temps réel".

### 3 Application à d'autres types situations

Dans le chapitre, une typologie des événements imprévus a été proposée ; ce qui nous permis de positionner notre étude dans le contexte des situations critiques donc consécutives à l'occurrence d'évènements sans précédent. Dans cette section, nous discutons des perspectives d'étude du concept de résilience dans le cadre d'évènements rares ou improbables où des données « expertes » peuvent servir de base aux études. Nous rappelons cette typologie des événements imprévus sur le Tableau 31. L'objectif est de disposer des données pour constituer par exemple une base d'apprentissage de réseau de neurones pour meilleure estimation et prédiction des indicateurs de résilience. Les événements situés dans la zone de critères dite inacceptable sont généralement gérés par les concepteurs de machines. Dans le cadre de cette section, il s'agit de s'intéresser aux événements dont la fréquence d'occurrence peut être improbable (aux conséquences critiques significatives ou mineures), rare (aux conséquences significatives ou mineures) ou probable (aux conséquences mineures).

**Tableau 31. Critères d'acceptabilité des risques en sûreté de fonctionnement [adapté normes EN 50126].**

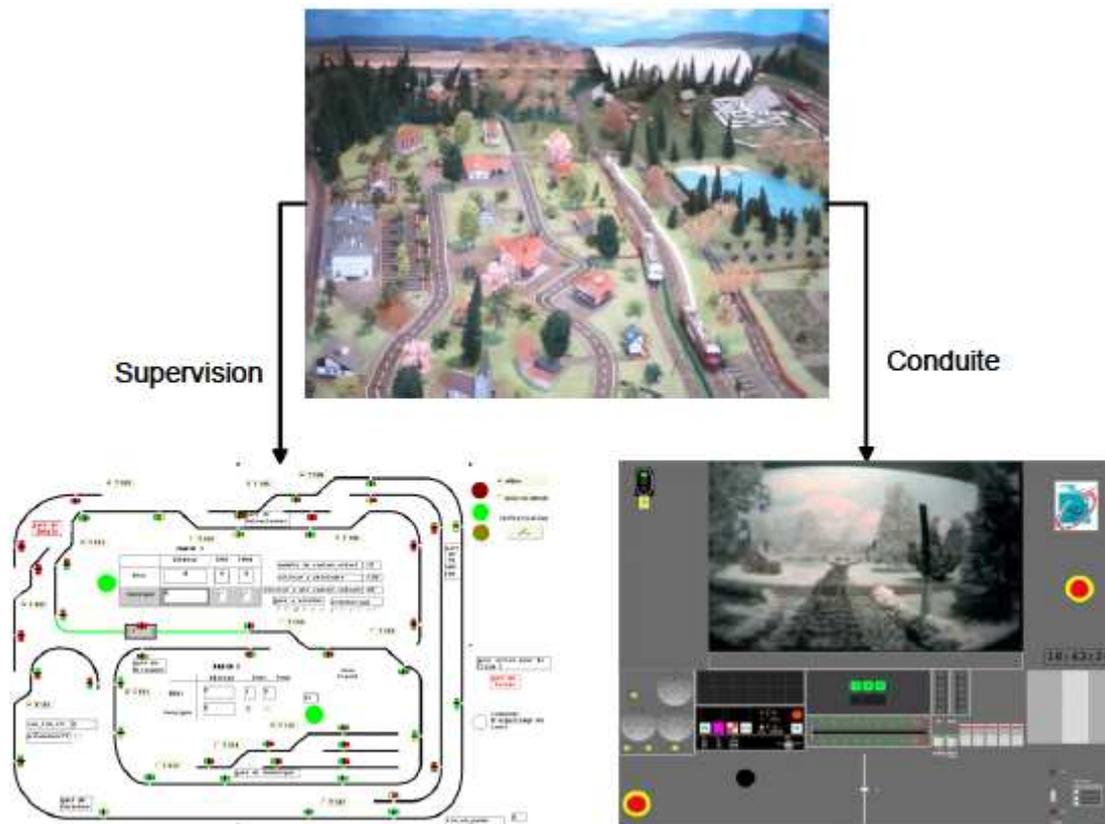
		Conséquences de l'évènement			
		Catastrophique	Critique	Significative	Mineure
Fréquence de l'évènement	Invraisemblable	Acceptable	Acceptable	Acceptable	Acceptable
	Improbable	Inacceptable	Indésirable	Acceptable	Acceptable
	Rare	Inacceptable	Inacceptable	Indésirable	Acceptable
	Probable	Inacceptable	Inacceptable	Inacceptable	Indésirable

Les données à prendre en compte sont issues de la campagne expérimentale mise au point lors du projet européen ITERATE. Ce projet intitulé Information Technology for Error Remediation And Trapping Emergencies (ITERATE) réunit les compétences de plusieurs laboratoires et experts du domaine : le centre d'étude des transports VTI (Suède), les universités de Leeds (Angleterre), Chalmers (Suède) et Ben Gurion (Israël), et les sociétés MTO Psychologie (Suède) et Kite (Italie). Les travaux de recherche portent sur la réalisation d'un modèle unifié de comportement de conducteurs dans le cadre de la conduite routière et ferroviaire face à des situations critiques [Cacciabue et Carsten, 2010]. L'une des plateformes de simulation utilisée «Cor&Gest», illustrée sur la Figure 48, a été développée pour simuler les activités de conduite et de supervision ferroviaires [Vanderhaegen, 2009]. Elle permet de sensibiliser les sujets simulés à différentes situations telles que les situations normales de conduite ou de supervision, mais également les situations liées à des perturbations techniques et/ou humaines donc potentiellement critiques.

Les problèmes de vigilance et de charge de travail dans les opérations de conduite ont été particulièrement étudiés. Trois événements majeurs relatifs au comportement du conducteur sont observés : le freinage pour l'arrêt en gare, la réduction de vitesse pendant la conduite ainsi que le freinage brusque pour respecter les consignes de vitesse et d'arrêt. Des données comme les écarts entre la vitesse réelle de conduite et celle de consigne sont également enregistrées. Par suite, plusieurs critères peuvent être évalués :

- Le critère «sécurité» en termes de respect des signalisations et des limitations de vitesse ;
- Le critère «qualité de départ en gare» lié au respect des horaires de départ du train ;

- Le critère «qualité de l'arrivée en gare» lié au respect des horaires d'arrivée du train en gare ;
- Le critère «charge de travail humaine» liée au nombre d'interactions entre le conducteur et le système de conduite.



**Figure 48. «Cor&Gest» plateforme ferroviaire pour mise en situation de contrôle et de supervision [Vanderhaegen, 2009]**

La plate-forme « Cor&Gest » permet de simuler les activités de conduite et de supervision ferroviaires. Différentes situations telles que les situations normales de conduite ou de supervision, mais également les situations liées à des perturbations techniques et/ou humaines régulières, irrégulières ou sans précédents, peuvent être mises au point. Certains risques ferroviaires consécutifs à des événements déjà survenus ou non, de fréquence d'occurrence improbable, rare ou même probable, sont donc simulables. Il s'agit par exemple des risques de collision (frontale, par l'arrière, latérale à une intersection de voies) entre deux trains, le déraillement de train, les défauts de signalisation, cassure ou déformation des voies, obstacle sur la voie, attentat criminel, etc.

A partir des critères définis et en fonction des scénarios à retenir, il est alors possible d'appliquer notre méthode d'évaluation de la résilience multicritère de ce SHM d'une part, et d'autre part de mettre en œuvre nos différents algorithmes d'apprentissage renforcé. Les données « expert » issues de l'analyse des accidents réels ferroviaires devraient permettre d'avoir d'excellents résultats d'estimation et/ou de prédiction des indicateurs de résilience.

## 4 Conclusion

Dans ce chapitre final, nous proposons quelques perspectives de recherche à la lumière des conclusions de nos contributions. Ces perspectives sont présentées en deux points.

Dans un premier temps, nos perspectives visent particulièrement le développement d'une méthode d'aide à l'action basée sur les indicateurs de résilience. Nous abordons alors la faisabilité de la prédiction en ligne de la résilience par l'intermédiaire d'un système embarqué ; avec notamment la prise en compte de la notion de récompense exprimée en termes de BCD à partir des indicateurs de résilience pour affiner nos prédictions et caractériser les bons et mauvais comportements des opérateurs humains. Nous abordons ensuite le principe de l'utilisation des outils d'aide à l'action et à la décision des opérateurs dans leurs choix d'actions à appliquer. Un exemple de mise en œuvre est détaillé pour illustrer nos propos.

Dans la dernière partie de ce chapitre, nous discutons des perspectives d'étude de l'évaluation de la résilience multicritère, de la mise œuvre de nos algorithmes ainsi que des différentes perspectives de recherche dans le cadre d'évènements rares, improbables et même probables où des données "expertes" peuvent servir de base aux études. Il s'agit d'exploiter les données issues des expérimentations menées sur la plateforme «Cor&Gest» dans le cadre du projet européen ITERATE. Les quatre critères définis devraient servir de la base à cette étude.



## Conclusion générale

Pour améliorer la sécurité, les concepteurs de machines mettent en place des systèmes de sécurité comme les barrières afin de limiter les conséquences d'évènements à risques. Néanmoins, les opérateurs se retrouvent souvent face à des évènements imprévus. Pour faire face à ces situations critiques, les chercheurs, notamment dans le domaine de la maîtrise des risques, préconisent l'émergence du concept de résilience. Les travaux menés dans le cadre de cette thèse concourent donc à l'évaluation de la résilience des Systèmes Homme-Machine face à des situations critiques par apprentissage renforcé. A cet effet, nous avons présenté une méthode de calcul d'un couple d'indicateurs de la résilience locale et globale à partir de critères prédéfinis en fonction du Système Homme-Machine considéré.

Dans le premier chapitre, nous abordons la problématique du management du risque dans les Systèmes Hommes-Machines. L'analyse des risques vise à identifier les causes d'un événement indésirable et ses conséquences. Nous présentons les outils de la sûreté de fonctionnement qui permettent d'étudier et d'évaluer les risques dans les systèmes en considérant la fiabilité, la disponibilité, la maintenabilité et la sécurité des équipements. Généralement, l'évaluation des risques est alors calculée par le produit de la probabilité d'occurrence de l'événement redouté et de la gravité des conséquences éventuelles. Par ailleurs, les causes des événements indésirables résultent de la combinaison de défaillances des composants techniques et d'erreurs humaines. Nous présentons donc les différentes méthodes d'analyse des risques centrées sur les facteurs techniques et celles centrées sur les facteurs humains. Ces méthodes d'analyse permettent de réduire l'occurrence des risques mais sont néanmoins limitées dans la prise en compte du comportement humain pourtant source de la majorité des accidents. En outre, la complexité croissante des systèmes technique et organisationnel peuvent conduire à l'occurrence d'évènements sans précédent ; d'où l'émergence du concept de résilience pour une maîtrise proactive de ces types d'évènements. Un état de l'art du concept de résilience est présenté. Les différentes définitions sont données et les méthodes de mesure de la résilience sont détaillées pour une analyse des apports et limites de ces méthodes. Une typologie des évènements imprévus est présentée et le concept de résilience est positionné par rapport à d'autres concepts comme la robustesse et la stabilité.

Afin de diminuer le niveau de risque dans un SHM face à une situation critique, plusieurs moyens sont envisageables, comme la mise en place de mécanismes de parades. Ces parades visent le traitement des fautes et la limitation de la propagation des défaillances. Ces moyens sont, entre autres, la redondance, la coopération et la mise en place de barrières. Néanmoins, face à une situation critique, ces mécanismes de parades ne suffisent plus. Nous abordons alors dans le second chapitre, les démarches et les outils d'aide à la réaction et à la récupération des systèmes face aux imprévus. Les méthodes de formation à la gestion de l'imprévu, les méthodes de raisonnement pour réagir à l'imprévu et les outils d'entraînement à la prise de décision face à l'imprévu sont donc détaillées. Ces méthodes sont essentiellement centrées sur l'opérateur humain, dans le but d'automatiser ses capacités cognitives afin de maîtriser au mieux les perturbations sans précédent. Nous abordons également les apports des processus humains d'apprentissage et des systèmes de contrôle et prédictifs d'aide à la résilience du SHM pour la gestion des imprévus. Quelques structures de contrôle itératif de l'apprentissage et les outils de prédiction notamment par réseaux de neurones sont résumés.

Nos différentes contributions font l'objet du troisième chapitre. Nous présentons la méthode d'évaluation de la résilience retenue et par la suite nous proposons l'intégration des indicateurs de résilience obtenus dans des processus d'apprentissage renforcé. Sur la base d'un ensemble de critères à définir en fonction du SHM étudié, nous calculons le couple (résilience locale, résilience globale) de chacun des critères. L'ensemble des couples d'indicateurs obtenus constitue la mesure de l'état de SHM en termes de résilience à un instant donné. Un exemple pratique de mesure de la résilience locale et globale est présenté pour illustrer le besoin du couple d'indicateurs de la résilience. Afin d'appréhender le niveau de criticité d'une situation et d'apprendre à partir de cette situation, nous préconisons de caractériser l'évolution de l'état du SHM en termes d'indicateurs de résilience. Nous proposons donc trois algorithmes d'apprentissage renforcé mis en œuvre au sein d'un outil d'estimation des couples d'indicateurs de résilience associés aux critères éventuellement non mesurables "en ligne". Deux niveaux de renforcement sont envisagés : un renforcement des paramètres d'estimation et un renforcement de la connaissance ; la connaissance étant gérée au sein d'un réseau de neurone de type carte de Kohonen.

Dans le quatrième chapitre, nous détaillons la mise en œuvre de nos différentes contributions au cours d'une campagne expérimentale et analysons les résultats obtenus. La campagne expérimentale a été menée dans le cadre du projet REI-REACT. Pour ce faire, un simulateur de vol de l'armée de la base aérienne d'Istres a été retenu. Nous présentons le dispositif expérimental, les deux scénarios de mise en situation critique proposés ainsi que le déroulement des expérimentations. Les retranscriptions du déroulé des expérimentations, nous ont permis d'étudier la pertinence de notre méthode d'évaluation de la résilience ainsi que la qualité d'estimation de notre outil. Une démarche de réaction à l'imprévu a été également développée et éprouvée au cours du projet REI-REACT. Par la suite, une comparaison des résultats obtenus avec ceux issus de l'analyse de la démarche REACT a permis de conforter nos contributions.

Suite à nos travaux, nous proposons des perspectives de recherche visant premièrement au développement d'un outil d'aide à l'action ou à la décision en situation critique. Puis, nous abordons la faisabilité de mener nos travaux dans le contexte des événements rares, improbables et même probables où des données "expertes" peuvent servir de base aux études.

## Bibliographie

[Alvarez, 2009] Alvarez, J. Simulateurs, virtualisation et jeux sérieux. Séminaire Vivaldi - "Le numérique, catalyseur de nouvelles pédagogies", Lille, 18-20 novembre 2009.

[Alvarez *et al.*, 2009] Alvarez, J., Gautellier, C., Rampnoux, O. Serious Game ou comment sont détournés les jeux vidéo. Article VEN n°531, Extrait du site officiel des CEMEA, 2009.

[Amalberti, 2001] Amalberti R. The paradoxes of almost totally safe transportation systems. *Safety Science*, pp. 109-126, 2001.

[Beauchamp, 2006] Beauchamp E. Learning from Diversity: Model-Based Evaluation of Opportunities for Process (Re)-Design and Increasing Company Resilience. 2nd Symposium on Resilience Engineering, Juan-les-Pins, France, November 8-10, 2006.

[Békaert *et al.*, 2011] Békaert J., Masclét G., Caron R. Les instruments de mesure de la résilience chez les adolescents ayant été confrontés à un traumatisme : une revue de la littérature. *Annales Médico-Psychologiques* 169, pp. 510–516, 2011.

[Belmonte, 2008] Belmonte F. Impact des postes centraux de supervision de trafic ferroviaire sur la sécurité. Thèse de doctorat, Université de Technologie de Compiègne, France. 10 septembre 2008.

[Ben-Yahia, 2012] Ben Yahia W. Contribution à la sécurité d'un système Homme-Agroéquipement: Spécification d'un générateur de plans d'actions alternatifs pour l'analyse d'erreurs humaines. Thèse de Doctorat, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, 2012.

[Boulanger, 2011] Boulanger J.-L. Maîtrise du SIL et gestion des certificats - Domaine ferroviaire. *Techniques de l'ingénieur*. Référence D5560, 2011.

[Boyd, 1976] Boyd J.R. Destruction & Creation. (Accessed 12.12.2012). [http://goalsys.com/books/documents/DESTRUCTION\\_AND\\_CREATION.pdf](http://goalsys.com/books/documents/DESTRUCTION_AND_CREATION.pdf)

[Buche, 2002] Buche C. Apprentissage par imitation pour les comportements d'agents autonomes. Rapport de DEA, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Brest, 2002.

[Bucak et Zohdy, 2001] Bucak I.O., Zohdy M.A. Reinforcement learning control of nonlinear multi-link system. *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 14, pp. 563–575, 2001.

[Cacciabue et Carsten, 2010] Cacciabue P.C., Carsten O. A simple model of driver behaviour to sustain design and safety assessment of automated systems in automotive environments. *Applied Ergonomics* 41, pp. 187–197, 2010.

[Catanese, 2009] Catanese B. Comment se former en jouant aux « serious game ». *Le Monde*, Edition du 24/11/09.

[Celik et Ertugrul, 2010] Celik O., Ertugrul S. Predictive human operator model to be utilized as a controller using linear, neuro-fuzzy and fuzzy-ARX modeling techniques. *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 23, pp. 595-603, 2010.

[Chaali-Djelassi, 2007] Chaali-Djelassi A. Modélisation et prédiction des Franchissements de Barrières basées sur l'Utilité Espérée et le Renforcement de l'Apprentissage. Application à la conduite automobile. Thèse de doctorat, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, 2007.

[Charpy, 1901] Charpy G. Note sur l'essai des métaux à la flexion par choc de barreaux entaillés, Mémoire et compte-rendus de la Société des ingénieurs civils de France, 1901.

[Chen *et al.*, 2007] Chen C-M., Lin C-W., Chen Y-C. Adaptive error-resilience transcoding using prioritized intra-refresh for video multicast over wireless networks. *Signal Processing: Image and Communication*, 22, pp. 277-297, 2007.

[Cheveau et Wybo, 2007] Cheveau F.-R., Wybo J.-L. Approche pratique de la culture de sécurité : pour une maîtrise des risques industriels plus efficace. *Rev. Fr. Gestion* 174, pp. 171-198, 2007.

[Cimellaro *et al.*, 2010] Cimellaro G.P., Reinhorn A.M., Bruneau M. Framework for analytical quantification of disaster resilience. *Engineering Structures* 32, pp. 3639-3649, 2010.

[Collin, 1999] Collin D. Attila passe, l'herbe pousse. *L'Agora*, volume 7, no 1, 1999.

[Comfort, 1999] Comfort L.K. *Shaved Risk: Complex Systems In Seismic Response*, Pergamon, Pittsbur & PA, 352 pages, 1999.

[Connor et Davidson, 2003] Connor K., Davidson J. Development of a new resilience scale: the Connor Davidson Resilience Scale (CD-RISC). *Depress Anxiety* 18, pp. 76-82, 2003.

[Cox *et al.*, 2011] Cox A., Prager F., Rose A. Transportation security and the role of resilience: A foundation for operational metrics. *Transport Policy* Volume 18, issue 2, pp. 307-317, March 2011.

[Cyrulnik, 2002] Cyrulnik B. *Un merveilleux malheur*. édition Odile Jacob, 1999 ; réédition 2002.

[De Carvalho *et al.*, 2006] de Carvalho P.V.R., dos Santos I.L., Gomes J.O., da Silva Borges M.R., Huber G.J. The Role of Nuclear Power Plant Operators' Communications in Providing Resilience and Stability in System Operation. 2nd Symposium on Resilience Engineering, Juan-les-Pins, France, November 8-10, 2006.

[Dekker, 2006] Dekker S.W.A. Resilience Engineering: chronicling the emergence of confuse consensus. In: E. Hollnagel, D.D. Woods & N.G. Leveson (eds.). *Resilience Engineering: concepts and percepts*. Aldershot, UK: Ashgate, 2006.

[Duan et al, 2007] Duan Y., Liu Q., Xu X. Application of reinforcement learning in robot soccer. *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 20, pp. 936-950, 2007.

[Enjalbert *et al.*, 2011] Enjalbert S., Vanderhaegen F., Pichon M., Ouedraogo K.-A., Millot P. Assessment of transportation system resilience. In: *Human Modelling in Assisted Transportation*. Part 3, pp. 335-341, 2011.

[Fiksel, 2003] Fiksel J. Designing Resilient, Sustainable Systems. *Environ. Sci. Technol.* 37, n°23, pp. 5330-5339, 2003.

- [Fiksel J., 2006] Fiksel J. Sustainability and resilience: toward a systems approach. *Sustainability: Science, Practice & Policy*, Volume 2 Issue 2, pp.14-21, 2006.
- [Gajewski *et al.*, 2008] Gajewski J.-F., Bezard C., Cabarbaye A. De la sûreté de fonctionnement à la résilience des systèmes. In 16<sup>ème</sup> congrès de Maitrise des Risques et de la sûreté de Fonctionnement, 2008.
- [Gao, 2010] Gao, F. Resilience Analysis and Measurement for Water Supply System. MS Thesis. University of Saskatchewan, Canada, 2010.
- [Goussé, 2008] Goussé V. Apport de la génétique dans les études sur la résilience : l'exemple de l'autisme. *Annales Médico-Psychologiques, revue psychiatrique*, volume 166, issue 7, pp. 523-527, 2008.
- [Grabot et Letouzey, 2000] Grabot B., Letouzey A. Short-term manpower management in manufacturing systems: new requirements and DSS prototyping. *Computers in Industry*, volume 43, issue 1, pp. 11-29, 2000.
- [Hale et Heijer, 2006] Hale A., Heijer T. Defining resilience. In: E. Hollnagel, D.D. Woods & N.G. Leveson (eds.). *Resilience Engineering: concepts and precepts*. Aldershot, UK: Ashgate, 2006.
- [Helmreich *et al.*, 1999] Helmreich R.L., Klinect J.R., Wilhelm J.A. Models of threat, error, and CRM in flight operations. In *Proceedings of the Tenth International Symposium on Aviation Psychology*. (pp. 677-682). Columbus, OH: The Ohio State University, 1999.
- [Hoc, 1996] Hoc J.M. *Supervision et contrôle de processus, La cognition en situation dynamique*. Presses Universitaires de Grenoble, 206 pages 1996.
- [Holling, 1973] Holling C.S. Resilience and stability of ecological systems. *Annual Review of Ecology and Systematics*, volume 4, pp. 1-23, 1973.
- [Holling, 1996] Holling C.S. Engineering resilience versus ecological resilience. In PC. Schulze (Ed) *Engineering within ecological constraints*, National academy Press, Washington, DC, pp. 31-43, 1996.
- [Hollnagel, 1998] Hollnagel E. *Cognitive reliability and error analysis method: CREAM*. Elsevier Science Ltd, Oxford, 287 pages 1998.
- [Hollnagel, 1999] Hollnagel E. Accident and barriers. 7<sup>th</sup> European Conference on Cognitive Science Approaches to Process Control, pp. 175-180, Villeneuve d'Ascq, France, 1999.
- [Hollnagel, 2006] Hollnagel E. Achieving system safety by resilience engineering. 1st Institution of Engineering and Technology International Conference on System Safety, 2006.
- [Hollnagel, 2007] Hollnagel E. Why do we need resilience engineering? (Accessed 12.12.2012).  
<http://www.sites.google.com/site/erikhollnagel2/whatisresilienceengineering%3F>
- [Hollnagel *et al.*, 2006] Hollnagel E., Woods D.D. Epilogue: resilience engineering precepts. In: Hollnagel E., Woods D.D., Leveson N. (Eds.), *Resilience Engineering: Concepts and Precepts*. Ashgate, 2006.

- [Hopkins, 2008] Hopkins R. The Transition Handbook. From oil dependency to local resilience, Chelsea Green Publishing, 240 pages, 2008.
- [Hsieh, 2009] Hsieh F.-S. Developing cooperation mechanism for multi-agent systems with Petri nets. *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 22, pp. 616-627, 2009.
- [Jang *et al.*, 1995] Jang T.J., Choi C.H., Ahn H.S. Iterative Learning Control in Feedback Systems. *Automatica* Volume 31, No.2, pp. 243-248, 1995.
- [Jen, 2003] Jen E. Stable or Robust? What's the difference? *Complexity*, volume 8, n° 3, pp. 12-18, 2003.
- [Karsenty *et al.*, 2010] Karsenty L., Quillaud A., Ouedraogo K.A., Enjalbert S., Vanderhaegen F. Cadre d'analyse pour appréhender la réactivité à l'imprévu d'un collectif. REACT: F02, Contrat de recherche n° 2009.34.0035, novembre 2010.
- [Karsenty *et al.*, 2011] Karsenty L., Quillaud A., Enjalbert S., Ouedraogo K.A., Vanderhaegen F. Analyses détaillées de l'activité d'un collectif appliquant la démarche REACT. REACT: F22, Contrat de recherche n° 2009.34.0035, novembre 2011.
- [Kirwan, 1997] Kirwan B. Validation of human reliability assessment techniques: part 2 - Validation results. *Safety Science*, volume 27, pp. 43-75, 1997.
- [Klein *et al.*, 2007] Klein G., McCloskey M., Pliske R., Schmitt J. Decision skills training. In: *Proceedings of the Human Factors Society 41th Annual Meeting*, pp. 182-185. Albuquerque, AL. Santa Monica, CA: The Human Factors Society, 2007.
- [Laprie *et al.*, 2004] Laprie J.C. Sûreté de fonctionnement des systèmes : concepts de base et terminologie. *Revue de l'Electricité et de l'Electronique (REE)*, ISSN 1265-6534, n°11, pp. 95-105, 2004.
- [Lee *et al.*, 2000] Lee T.H., Tan K.K., Lim S.Y., Dou H.F. Iterative learning control of permanent magnet linear motor with relay automatic tuning. *Mechatronics* 10, pp. 169-190, 2000.
- [Lee et Lee, 2007] Lee J.H., Lee K.S. Iterative learning control applied to batch processes: An overview. *Control Engineering Practice* 15. pp. 1306–1318. 2007.
- [Legros, 2009] Legros D. Maîtrise des risques dans les systèmes de transport: Proposition d'une nouvelle approche de modélisation dynamique. Thèse de doctorat, école nationale supérieure des mines de Paris, France. 2009.
- [Leplat, 2007] Leplat J. Pistes à suivre. *Pistes* volume 9, No. 2, Octobre 2007. (Accédé le 17.11.11). <http://www.pistes.uqam.ca/v9n2/articles/v9n2a2.htm>
- [Lhomme *et al.*, 2010] Lhomme S., Serre D., Diab Y., Laganier R. Les réseaux techniques face aux inondations ou comment définir des indicateurs de performance de ces réseaux pour évaluer la résilience urbaine. *Bulletin de l'Association de géographes français. Geographies*, pp. 487-502, 2010.
- [Ludwig *et al.*, 1997] Ludwig D., Walker B., Holling C.S. Sustainability, stability and resilience. *Conservation Ecology*, volume 1, n° 1, art. 7, 1997.

[Lundberg *et* Johansson, 2006] Lundberg J., Johansson B. Resilience, stability and requisite interpretation in accident investigations. In E. Hallnagel et E. Rigaud (Eds), Proceedings of the Second Resilience Engineering Symposium, Antibes Juan-les-Pins, France, 8-10 November, 2006.

[Lundberg *et* Johansson, 2007] Lundberg J., Johansson B. Pragmatic Resilience. In proceedings of the resilience engineering workshop, Vadstena, Sweden, 2007.

[Luo et Yang, 2002] Luo M.-Y., Yang C.-S. Enabling fault resilience for web services. *Comput. Commun.* 25, 198–209, 2002.

[Luzeaux, 2009] Luzeaux D. Résilience du/des système(s) socio-technique(s) de défense. Presentation Heudiasyc. 2009.

[Malcuit *et al.*, 1995] Malcuit G., Pomerleau A., Maurice P. Psychologie de l'apprentissage. Termes et concepts. Québec: EDISEM, MALOINE. 1995.

[Marcantoni, 2009] Marcantoni W.S. Mécanismes cellulaires de l'apprentissage. (Accédé le 17.11.11). <http://www.unites.uqam.ca/cnc/psy4042/mecanismesneuronaux.pdf>

[Marshall, 2002] Marshall G. Resilience: Resilience, Reliability and Redundancy. WSP Communications Ltd & David Chapman, Copper Development Association. May 2002.

[Martin, 2005] Martin S. La résilience dans les modèles de systèmes écologiques et sociaux. Thèse de doctorat, Ecole Normale Supérieure de Cachan, France. 17 Juin 2005.

[Millot, 1999] Millot P. Systèmes Homme-Machine et Automatique. Conférence plénière invitée aux Journées Doctorales de l'Automatique JDA'99, Nancy - France, pp. 1-24, 1999.

[Mortureux, 2002] Mortureux Y. Arbres de défaillance, des causes et d'événement. *Techniques de l'Ingénieur, traité L'entreprise industrielle*. Référence SE 4050. 10 oct. 2002

[Nakayama *et al.*, 2007] Nakayama H., Ansari N., Jamalipour A., Kato N. Fault-resilient sensing in wireless sensor networks. *Computer Communication*, 30, pp. 2375-2384, 2007.

[Neema *et al.*, 2004] Neema S., Bapty T., Shetty S., Nordstrom S. Autonomic fault mitigation in embedded systems. *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 17, 711–725, 2004.

[Numanoglu, 2006] Numanoglu T., Tavli B., Heinzelman W. Energy efficiency and error resilience in coordinated and non-coordinated medium access control protocols. *Computer Communications*, 29, pp. 3493-3506, 2006.

[Oedewald et Reiman, 2006] Oedewald P., Reiman T. Using subjective measures to monitor the systems' capability to manage complexity – evidence from the nuclear industry and health care. 2nd Symposium on Resilience Engineering, Juan-les-Pins, France, November 8-10, 2006.

[Orwin *et* Wardle, 2004] Orwin K.H., Wardle D.A. New indices for quantifying the resistance and resilience of soil biota to exogenous disturbances. *Soil Biology & Biochemistry*, 36, pp. 1907-1912, 2004.

[Ouedraogo *et al.*, 2010a] Ouedraogo K.A., Enjalbert S., Vanderhaegen F. How to learn from the resilience of Human-Machine Systems? In: Proceedings of the 11<sup>th</sup> IFAC/IFIP/IFORS/IEA Symposium on Analysis, Design and Evaluation of Human-Machine Systems. Valenciennes, France. 2010.

[Ouedraogo *et al.*, 2010b] Ouedraogo K.A., Enjalbert S., Vanderhaegen F. Principes de résilience et processus d'apprentissage face à l'imprévu. In: Proceedings of the 6<sup>ème</sup> Conférence Internationale Francophone d'Automatique. Nancy, France. 2010.

[Ouedraogo *et al.*, 2011] Ouedraogo K.-A., Enjalbert S., Vanderhaegen F. A State of the Art of Feedforward-Feedback Learning based Systems to Predict Human Errors. 18th IFAC World Congress, pp. 7390-7395, Milano, Italy, 2011.

[Ouedraogo *et al.*, 2013] Ouedraogo K.-A., Enjalbert S., Vanderhaegen F. How to learn from the resilience of Human-Machine Systems? Engineering Applications of Artificial Intelligence Volume 26, Issue 1, Pages 24–34, January 2013.

[Pavard *et al.*, 2006] Pavard B., Dugdale J., Bellamine-Ben Saoud N., Darcy S., Salembier P. Design of robust socio-technical systems. 2nd Symposium on Resilience Engineering, Juan-les-Pins, France, November 8-10, 2006.

[Pérez-España et Arreguín-Sánchez, 1999] Pérez-España H., Arreguín-Sánchez F. Complexity related to behavior of stability in modeled coastal zone ecosystems. Aquatic Ecosystem Health and Management 2, pp. 129–135, 1999.

[Pérez-España *et* Arreguín-Sánchez, 2001] Pérez-España H., Arreguín-Sánchez F. An inverse relationship between stability and maturity in models of aquatic ecosystems. Ecological Modelling, 145, pp.189-196, 2001.

[Pimm, 1984] Pimm S.L. The complexity and stability of ecosystems. Nature 307, pp. 321-326, 1984.

[Polet, 2002] Polet P. Modélisation des Franchissements de Barrières pour l'Analyse des Risques des Systèmes Homme-Machine. Thèse de doctorat, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, 2002.

[Polet *et al.*, 2002] Polet P., Vanderhaegen F., A. Wieringa P. Theory of safety-related violations of system barriers. Cognition, Technology and Work, volume 4, n°3, pp.171-179, 2002.

[Polet *et al.*, 2009] Polet P., Vanderhaegen F., Millot P. Human Behaviour Analysis of Barrier Deviations Using a Benefit-Cost-Deficit Model. Advances in Human-Computer Interaction, volume 2009, Article ID 642929, 10 pages, 2009.

[Polet *et al.*, 2012] Polet P., Vanderhaegen F., Zieba S. Iterative learning control based tools to learn from human error. Engineering Applications of Artificial Intelligence Volume 25, Issue 7, Pages 1515–1522, October 2012.

[Quah *et al.*, 2005] Quah K.H, Quek C., Leedman G. Reinforcement learning combined with a fuzzy adaptive learning control network (FALCON-R) for pattern classification. Pattern Recognition 38, pp. 513–526, 2005.

[Quéva, 2008] Quéva S. Méthode d'évaluation de la réactivité et de l'adaptabilité humaines dans le contrôle des risques – Application à la conduite de transport urbain guidé. Thèse de Doctorat. Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, 2008.

[Quillaud *et al.*, 2010] Quillaud A., Ouedraogo K.A., Vanderhaegen F., Enjalbert S. Etat de l'art : Démarches et outils pour réagir à l'imprévu. REACT: F03, Contrat de recherche n° 2009.34.0035, novembre 2010.

[Rasmussen, 1983] Rasmussen J. Skills, Rules and Knowledge: Signals, signs and symbols and others distinctions in human performance models. IEEE SMC n°3, 1983.

[Reason, 1990] Reason J. Human Error. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1990.

[Richard, 2012] Richard P. Contribution à la formalisation et à la l'identification de la stabilité humaine au regard de la sécurité : application aux transports guidés. Thèse de doctorat, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, 2012.

[Rigaud, 2011] Rigaud E. Resilience and safety management: ideas for innovating in industrial safety. Number 2011-08 of the Cahiers de la Sécurité Industrielle, Institute for an Industrial Safety Culture, Toulouse, France (ISSN 2100-3874). 2011. [Accédé le 12/01/2012] [http://www.icsi-eu.org/francais/dev\\_cs/cahiers/](http://www.icsi-eu.org/francais/dev_cs/cahiers/)

[Saaty, 2008] Saaty T.L. Decision making with the analytic hierarchy process. Int. J. Services Sciences, Volume 1, No. 1, pp. 83-98, 2008.

[Schneider Electric, 2004] Schneider Electric. La Sûreté de Fonctionnement (SdF). Intersections – le magazine Schneider Electric de l'enseignement technologique et professionnel édition, Novembre 2004.

[Seybold *et al.*, 1999] Seybold C.A., Herrick J.E., Brejda J.J. Soil resilience: a fundamental component of soil quality. Soil Sci. 164, pp. 224–234, 1999.

[Shih *et al.*, 2009] Shih P., Kaul B.C., Jagannathan S., Drallmeier J.A. Reinforcement-Learning-Based Output-Feedback Control of Nonstrict Nonlinear Discrete-Time Systems with Application to Engine Emission. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics – Part B: Cybernetics, volume 39, N°5, October 2009.

[Sperandio, 1988] Sperandio J.C. Ergonomie du travail mental. Editions Masson, Paris, 1988.

[Steen et Aven, 2011] Steen R., Aven T. A risk perspective suitable for resilience engineering. Safety Science 49, pp. 292–297, 2011.

[Sutton et Barto, 1998] Sutton R.S., Barto A.G. Reinforcement Learning: An Introduction. A Bradford Book. The MIT Press Cambridge, Massachusetts London, England. 1998. [Accédé le 12/01/2012] <http://webdocs.cs.ualberta.ca/~sutton/book/chapter1.pdf>

[Swain et Guttman, 1983] Swain A.D., Guttman H.E. Handbook of Reliability Analysis with emphasis on Nuclear Plant Applications. Nuclear Regulatory Commission, NUREG/CR-128, Washington DC, 1983.

[Tianfield et Unland, 2004] Tianfield H., Unland R. Towards autonomic computing systems. Engineering Applications of Artificial Intelligence 17, pp. 689–699, 2004.

[Touzet, 1992] Touzet C. Les réseaux de neurones artificiels. [Accédé le 17.11.11]. [http://gsite.univ-provence.fr/gsite/Local/umr\\_6149/umr/page\\_perso/Touzet/Les\\_reseaux\\_de\\_neurones\\_artificiels.pdf](http://gsite.univ-provence.fr/gsite/Local/umr_6149/umr/page_perso/Touzet/Les_reseaux_de_neurones_artificiels.pdf)

[Vanderhaegen, 1997] Vanderhaegen F. Multilevel organization design: the case of the air traffic control. *Control Eng. Pract.* 5 (3), pp. 391–399, 1997.

[Vanderhaegen, 1999a] Vanderhaegen F. APRECIH: a human unreliability analysis method - application to railway system. *Control Engineering Practice*, volume 7, pp. 1395-1403, 1999.

[Vanderhaegen, 1999b] Vanderhaegen F. Cooperative system organisation and task allocation: illustration of task allocation in air traffic control. *Le Travail Humain* 63 (3), pp. 197–222, 1999.

[Vanderhaegen, 2003] Vanderhaegen F. *Analyse et contrôle de l'erreur humaine*. Hermès Science Publication, Lavoisier. Paris, France. 2003.

[Vanderhaegen 2004] Vanderhaegen F. The benefit-cost-deficit (BCD) model for human analysis and control. *Proceedings of the Ninth IFAC/IFORS/IEA Symposium on Analysis, Design, and Evaluation of Human-Machine Systems*, Atlanta, GA, USA, 7–9 September 2004.

[Vanderhaegen, 2009] Vanderhaegen F. Rail simulation to study human reliability. *Proceedings of the 3rd international conference on Rail Human Factors*, Lille, France, 2009.

[Vanderhaegen 2010a] Vanderhaegen F. Human-error-based design of barriers and analysis of their uses. *Cognit. Technol. Work* 12, pp. 133–142, 2010.

[Vanderhaegen 2010b] Vanderhaegen F. Autonomy control of Human-Machine Systems. *The 11th IFAC/IFIP/IFORS/IEA Symposium on Analysis, Design, and Evaluation of Human-Machine Systems*. Valenciennes, France, 2010.

[Vanderhaegen et Millot 2001] Vanderhaegen F., Millot P. Cooperative redundancy to control human reliability. *Proceeding of the 10th IFAC Symposium on information control problems in manufacturing, INCOM'01*, 20-22 septembre, Vienna, Austria, 2001.

[Vanderhaegen *et al.*, 2009] Vanderhaegen F., Polet P., Zieba S. A reinforced iterative formalism to learn from human errors and uncertainty. *Engineering Applications and Artificial Intelligence* 22, pp.654-659, 2009.

[Vanderhaegen *et al.*, 2011] Vanderhaegen F., Zieba S., Enjalbert S., Polet P. A benefit/cost/deficit (BCD) model for learning from human errors. *Reliab. Eng. System Saf.* 96 (7), pp. 757–766. 2011.

[Villaren et al., 2012] Villaren T., Coppin G., Léal A. Modeling Task Transitions to Help Designing for Better Situation Awareness. *EICS 2012: ACM SIGCHI Symposium on Engineering Interactive Computing Systems*, ACM, Copenhagen, Denmark, pp. 195-204, ISBN 978-1-4503-1168-7, 2012.

[Villemeur, 1988] Villemeur A. *Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels : fiabilité, facteur humain, informatisation*. Eyrolles, 1988.

[Wang *et al.*, 2010] Wang J.W., Gao F., Ip W.H. Measurement of resilience and its application to enterprise information systems. *Enterprise Information Systems* 4, volume 2, pp. 215–223, 2010.

[Wang et Usher, 2005] Wang Y.-C., Usher J.M. Application of reinforcement learning for agent-based production scheduling. *Engineering Applications and Artificial Intelligence* 18, pp. 73–82, 2005.

[Westrum, 2006] Westrum R. A typology of resilience situations. In: Hollnagel, E., Woods, D., Leveson, N. (Eds.), *Resilience Engineering: Concepts and Precepts*. Ashgate, Aldershot, UK, 2006.

[Weick, 1993] Weick KE. The collapse of sensemaking in organizations: The Mann Gulch disaster, *Administrative Science Quarterly*, December, pp. 628-652, 1993.

[Werner et Smith] Werner E. E., Smith R. S. *Vulnerable but invincible: A study of resilient children*. New York: McGraw-Hill, 1982.

[Wiering et Van Hasselt, 2008] Wiering M.A., Van Hasselt H. Ensemble Algorithms in Reinforcement Learning. *IEEE Transactions On Systems, Man, and Cybernetics – Part B: Cybernetics*, volume 38, NO.4, August 2008.

[Wreathall, 2006] Wreathall J. Properties of resilient organisations: an initial view. In: Hollnagel, E., Woods, D., Leveson, N. (Eds.), *Resilience Engineering: Concepts and Precepts*. Ashgate, Aldershot, UK, 2006.

[Xu *et al.*, 2004] Xu J.-X., Le T.H., Zhang H.-W. Analysis and comparison of iterative learning control schemes. *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 17, pp. 675-686, 2004.

[Yannakakis *et al.*, 2009] Yannakakis G.N., Maragoudakis M., Hallam J., Preference Learning for cognitive Modeling : A Case Study on Entertainment Preferences. *IEEE Transactions on systems, Man, and Cybernetics – Part A: Systems and Humans*, vol. 39 N°6. November 2009.

[Yan et Shiu, 2008] Yan M.-T., Shiu Y.-J. Theory and application of a combined feedback–feedforward control and disturbance observer in linear motor drive wire-EDM machines. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 48. pp. 388–401. 2008.

[Zemouri, 2003] Zemouri M.R. Contribution à la surveillance des systèmes de production à l'aide des réseaux de neurones dynamiques : Application à la e-maintenance. Thèse de Doctorat, Université de Franche-Comte, 2003.

[Zhang, 2004] Zhang Z. Fiabilité humaine : prédiction des violations par réseaux de neurones et application aux systèmes de transport. Thèse de Doctorat, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, 2004.

[Zhang et Lin, 2010] Zhang W.J., Lin Y. On the principle of design of resilient systems - application to enterprise information systems. *Enterprise Information Systems* 4, volume 2, pp. 99-110, May 2010.

[Zieba, 2009] Zieba S. Contribution à la résilience d'un système coopérative Homme-robot par une gestion de l'autonomie ajustable. Thèse de Doctorat, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, 2009.

[Zieba *et al.*, 2007] Zieba S., Jouglet D., Polet P., Vanderhaegen F., Resilience and affordances: perspectives for human-robot cooperation? Paper presented at the 26th European Annual Conference on Human Decision Making and Manual Control, Copenhagen, Denmark, 2007.

[Zieba *et al.*, 2009] Zieba S., Polet P., Vanderhaegen F., Debernard S. Resilience of a human– robot system using adjustable autonomy and human–robot collaborative control. *Int. J. Adaptive Innovative Systems* 1 (1), pp. 13–29, 2009.

[Zieba *et al.*, 2010] Zieba S., Polet P., Vanderhaegen F. Using adjustable autonomy and human–machine cooperation to make a human–machine system resilient - application to a ground robotic system. *Inf. Sci.* 181 (3), pp. 379–397, 2011.

## **Apprentissage renforcé appliqué à l'évaluation de la résilience d'un Système Homme-Machine face à des situations critiques**

Nous définissons la résilience comme la capacité d'un Système Homme-Machine (SHM) à s'adapter positivement face à des situations critiques engendrées par des événements sans précédent dont la fréquence d'occurrence est invraisemblable et dont les conséquences sur le système sont critiques voire catastrophiques.

Nous présentons d'abord un état de l'art reposant sur le concept de résilience que nous positionnons par rapport aux approches classiques de la sûreté de fonctionnement pour l'évaluation et la gestion des risques dans les SHM. Nous présentons ensuite des méthodes et des outils d'aide à la réaction et à la récupération des systèmes face à l'imprévu. Nous nous intéresserons également à l'apport des techniques d'apprentissage itératif pour le management de la résilience des SHM. Nous proposons alors une méthode d'évaluation de la résilience basée sur un couple d'indicateurs multicritères. Un estimateur reposant sur un réseau de neurones à apprentissage renforcé est proposé pour évaluer les indicateurs de résilience non mesurables "en ligne". Pour fiabiliser l'estimation, nous proposons un apprentissage itératif associé soit à un renforcement des paramètres d'estimation, soit à un renforcement de la base de connaissances, soit les deux simultanément.

Nous appliquons nos propositions lors d'une simulation de vol d'un Groupe de Ravitaillement en Vol, composé d'un équipage tournant de 4 personnes. L'analyse des résultats expérimentaux montre la pertinence de nos contributions. Certaines perspectives de recherche sont ensuite abordées notamment l'extension de l'étude aux événements de criticité moindre et dont on disposerait d'une base de connaissances « experte ».

**Mots clés :** résilience, Système Homme-Machine, apprentissage itératif, réseau de neurones.

---

## **Reinforced learning applied to Human-Machine System resilience assessment facing critical situations**

We define resilience as the ability of a Human-Machine System (HMS) to adapt itself positively facing critical situations resulting from the unprecedented events whose frequency of occurrence is unlikely and the consequences on the system are critical even catastrophic.

We first present a state of the art based on the concept of resilience that we position compared to classic dependability approaches for HMS risk evaluation and management. We then present methods and support tools for the reaction and the recovery of systems facing the unexpected. We also detail the contribution of iterative learning techniques for the management of the SHM resilience. We propose then a method for resilience assessment based on a couple of multi-criteria indicators. An estimator based on a neural network with reinforced learning process is proposed to evaluate the "online" not measurable resilience indicators. For reliable estimation, we propose an iterative learning associated with a estimation parameters reinforcement process, or knowledge base reinforcement process, or both simultaneously.

We apply our proposals during a flight simulation of a "Groupe de Ravitaillement en Vol", consisting of a rotating crew of 4 persons. The analysis of experimental results shows the effectiveness of our contributions. Some research perspectives are then discussed in particular the extension of the study to less critical events which would provide an "expert" knowledge base.

**Keywords:** resilience, Human-Machine System, iterative learning, neural network.

---