

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 PROBLÉMATIQUE DE RECHERCHE.....	3
1.1 Éléments de la problématique de recherche.....	3
1.1.1 Des modèles d'accidents du travail à la gestion de la SST.....	3
1.1.2 Vers un changement de paradigme en gestion de la SST	14
1.1.2.1 Les systèmes de gestion de la SST	15
1.1.2.2 Processus de gestion du risque.....	17
1.1.2.3 Les risques émergents	21
1.1.2.4 Les limites des méthodes actuelles	23
1.2 L'ingénierie de la résilience.....	24
1.2.1 Les théories de la résilience	24
1.2.2 L'ingénierie de la résilience.....	26
1.2.2.1 La variabilité de la performance	29
1.2.2.2 Le Functional Resonance Analysis Method (FRAM)	32
1.3 Objectif de recherche	37
CHAPITRE 2 MÉTHODOLOGIE.....	39
2.1 L'étude de cas comme méthode de recherche	39
2.2 Collecte des données.....	41
2.2.1 Analyse documentaire de l'entreprise.....	42
2.2.2 Entrevues semi-dirigées.....	43
2.2.3 Observations directes.....	43
2.3 Traitement des données.....	44
CHAPITRE 3 RESILIENCE ENGINEERING FOR SUSTAINABLE PREVENTION IN THE MANUFACTURING SECTOR: A COMPARATIVE STUDY OF TWO METHODS OF RISK ANALYSIS	45
3.1 Introduction.....	47
3.2 Resilience engineering as a model of risk management.....	49
3.3 The functional resonance analysis method (FRAM)	50
3.4 Methodology	53
3.4.1 Failure mode effect and criticality analysis (FMECA).....	53
3.4.2 Functional resonance analysis method (FRAM).....	54
3.5 Results.....	55
3.6 Discussion.....	58
3.7 Conclusion and future work.....	61
3.8 References.....	63

CONCLUSION.....	66
ANNEXE I GRILLE D’ENTREVUE SEMI-DIRIGÉE	69
ANNEXE II LISTE DES PUBLICATIONS	73
ANNEXE III ARTICLE: MANAGING OHS IN COMPLEX AND UNPREDICTABLE MANUFACTURING SYSTEM: CAN FRAM BRING AGILITY?	75
ANNEXE IV RÉSUMÉ CONFÉRENCE AQHSST.....	81
ANNEXE V PRÉSENTATION CONFÉRENCE AQHSST.....	83
ANNEXE VI AFFICHE concours de vulgarisation ÉREST.....	93
LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	95

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1	Types d'AMDEC.....20
Tableau 1.2	Distinction entre les approches traditionnelles et l'ingénierie de la résilience28

LISTE DES FIGURES

		Page
Figure 1.1	Théorie des dominos.....	4
Figure 1.2	Modèle du fromage suisse	8
Figure 1.3	Structure hiérarchique.....	11
Figure 1.4	Évolution de la modélisation des accidents	15
Figure 1.5	Nombre de décès selon la catégorie de dossier et le sexe.....	16
Figure 1.6	Nombre de cas de lésions professionnelles.....	17
Figure 1.7	Processus global de gestion du risque.....	18
Figure 1.8	Variabilité de la performance.....	30
Figure 1.9	Représentation graphique d'une fonction selon le FRAM	33
Figure 2.1	Démarche méthodologique	40
Figure 2.2	Processus de cueillette des données.....	42

INTRODUCTION

Depuis le début de l'ère industrielle, les entreprises manufacturières québécoises ont dû s'adapter à des changements rapides occasionnés par des innovations technologiques, l'évolution de la société et l'ouverture des marchés internationaux. Pour demeurer concurrentielles, ces entreprises doivent innover et se renouveler rapidement. Elles sont donc devenues des systèmes socio-techniques complexes et difficilement prévisibles, où l'interaction entre l'humain et son environnement de travail crée parfois des risques émergents pour la santé et la sécurité des travailleurs. Ce dynamisme crée un défi de taille pour les praticiens en SST dans les milieux de travail puisque la plupart des méthodes de gestion des risques, largement utilisées actuellement dans le secteur manufacturier québécois, sont statiques et réactives. Ainsi, elles comportent plusieurs lacunes qui en limitent leur efficacité lorsque mises en application dans les systèmes d'aujourd'hui. La capacité d'anticiper les risques émergents est maintenant un enjeu important pour toutes les entreprises qui désirent augmenter leur performance en SST. Il y a donc lieu d'apporter un changement de paradigme en termes de gestion de la SST et de prévention des accidents de travail qui puisse considérer le caractère émergent des risques. Plus spécifiquement, les facteurs organisationnels et humains, reliés à l'environnement dans lequel évoluent les entreprises manufacturières, jouent un rôle déterminant dans la sécurité du système.

Cette recherche vise tout d'abord à démontrer l'importance de s'intéresser à la problématique de gestion des risques émergents de nature organisationnelle et humaine dans le milieu manufacturier, étant donné les impacts potentiels sur la santé et la sécurité des travailleurs. Elle vise ensuite à enrichir les connaissances sur la gestion des risques émergents dans le milieu manufacturier en proposant l'utilisation d'une démarche complémentaire pour l'analyse des risques organisationnels et humains. Plus spécifiquement, cette recherche tente de répondre à plusieurs questions : Est-ce que les méthodes d'analyse de risques utilisées dans le milieu manufacturier sont suffisantes pour assurer la sécurité du système? Comment intégrer l'analyse des risques organisationnels et humains dans le processus global d'appréciation du risque?

Pour cela, une étude de cas unique d'une entreprise québécoise issue du secteur manufacturier a été réalisée.

Ce rapport de recherche est structuré comme suit. Le premier chapitre présente une revue de la littérature qui met en lumière les éléments importants de notre problématique. En effet, l'avancement de la recherche sur les modèles d'accident du travail et les méthodes d'analyse de risques viennent soutenir le besoin marqué d'une évolution en matière de gestion de la SST et dans la façon dont les risques émergent du fonctionnement des systèmes socio-techniques sont analysés et traités. Plusieurs éléments importants y seront présentés et discutés, entre autres celui d'un courant de pensée novateur en matière de gestion de la SST, l'ingénierie de la résilience. Ce nouveau paradigme est au cœur de plusieurs recherches dans la communauté scientifique puisqu'il confronte plusieurs mythes associés à la gestion traditionnelle de la SST. Le deuxième chapitre présente la démarche méthodologique suivie pour cette étude en détaillant les phases de cueillette et de traitement des données. Le troisième chapitre présente les résultats obtenus sous forme d'un article scientifique. Dans cet article, il est question de la comparaison des résultats obtenus avec une méthode d'analyse de risque traditionnelle et de ceux obtenus avec une méthode systémique novatrice. Nous traitons également de la question de complémentarité entre les deux approches.

Cette recherche vise à fournir une approche différente en termes de gestion des risques émergents de nature organisationnelle ou humaine en intégrant de nouvelles façons de faire mais, surtout, en visant un changement de paradigme dans la façon de voir et de considérer la sécurité industrielle dans le secteur manufacturier.

CHAPITRE 1

PROBLÉMATIQUE DE RECHERCHE

Ce premier chapitre présente les éléments de notre problématique de recherche et met en perspective ce projet de recherche par une revue de littérature. Ce chapitre est structuré de la façon suivante : la première section (1.1) identifie les trois éléments de notre problématique. La deuxième section (1.2) présente une approche prometteuse en matière de gestion des risques, soit l'ingénierie de la résilience ainsi qu'une méthode d'analyse de risque qui reflète les principes de l'ingénierie de la résilience. Finalement, la dernière section (1.3) formule les questions de recherche ainsi que le détail de l'objectif de la recherche.

1.1 Éléments de la problématique de recherche

Notre problématique de recherche comporte trois principaux éléments. Cette section de ce chapitre détaille chacun de ces éléments.

1.1.1 Des modèles d'accidents du travail à la gestion de la SST

Les premières réflexions portant sur la santé au travail datent de l'Antiquité. Par contre, c'est dans les années 1930 que les scientifiques ont commencé à se pencher sur l'accident du travail et plus précisément sur la compréhension du phénomène accidentel. À cette époque, le principal intérêt était de comprendre comment survenait un accident du travail pour être en mesure d'éviter sa récurrence. Les premiers modèles visant à décrire le processus par lequel un accident est généré sont apparus. Ces premiers modèles ont été classés dans la catégorie des modèles séquentiels.

Les modèles séquentiels de l'accident reposent sur le principe que les événements suivent une séquence dans un ordre déterminé. Les causes des accidents sont reliées à des dysfonctionnements ou à des défaillances d'un ensemble de composantes. L'approche des

modèles séquentiels suppose que la prévention d'un accident se fait en éliminant des évènements ou des situations pouvant mener à ces dysfonctionnements ou à ces défaillances.

En 1931, Heinrich publie un livre intitulé *Industrial Accident Prevention*, dans lequel il propose un modèle d'accident qu'il nomme la théorie des dominos. Ce modèle représente l'accident comme une causalité simple et linéaire. Selon ce modèle, l'accident est l'aboutissement d'une suite d'évènements placés dans un ordre particulier conduisant à l'accident. Ce modèle suppose que l'évènement, soit l'accident, survienne en raison d'une seule cause unique et qu'il suffit d'éliminer cette cause pour éviter que l'évènement ne se reproduise. La théorie des dominos est basée sur l'élimination de la cause fondamentale (Root Cause Analysis) d'un accident pour éviter sa récurrence. Selon ce modèle d'accident, il y a cinq facteurs impliqués dans une séquence d'accident : 1) l'environnement social; 2) l'erreur humaine; 3) l'action imprudente ou condition dangereuse; 4) l'accident; 5) la blessure. La figure 1.1 ci-dessous représente le modèle avec les cinq facteurs impliqués dans le processus accidentel.

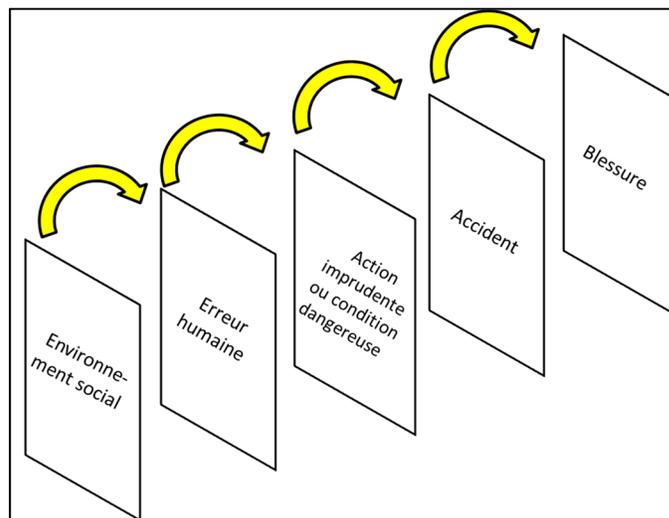


Figure 1.1 Théorie des dominos

La simplicité de ce modèle en a fait un modèle très populaire dans l'industrie. Les modèles d'accidents séquentiels supposent que la relation de cause à effet entre des événements consécutifs est linéaire et déterministe (Qureshi, 2007).

Les modèles séquentiels présentent plusieurs lacunes au niveau de l'analyse des différents facteurs qui entrent dans la composition d'un accident. C'est à la suite de l'accident de l'usine nucléaire *Three Mile Island*, le 28 mars 1979, aux États-Unis, que plusieurs chercheurs se sont questionnés sur les modèles existants. Les événements de cette catastrophe industrielle ont suscité beaucoup de questionnements quant à l'efficacité des modèles existants utilisés pour prévenir les accidents du travail. Le rapport d'accident indique que ce dernier serait attribuable à une chaîne d'événements accidentels plutôt qu'à une seule cause fondamentale, laissant ainsi présumer de la présence de plusieurs facteurs contributifs.

Pour combler les écarts des modèles séquentiels, des nouvelles méthodes de modélisation d'accidents ont été développées et proposées en y intégrant la notion d'interaction entre plusieurs facteurs dans le processus accidentel. Ces modèles, dits épidémiologiques, considèrent les événements menant à des accidents comme le résultat d'une combinaison de facteurs, certains étant évidents et certains étant latents et présents à un moment donné et dans un espace donné (Hardy, 2011). Ces modèles sont différents des modèles séquentiels à quatre niveaux (Hollnagel, 2004) :

- 1) La notion de déviation de la performance est préférée au terme d'erreur humaine;
- 2) Les conditions environnementales peuvent mener à la déviation de la performance;
- 3) Les barrières permettent de prévenir les conséquences inattendues et sont en mesure d'arrêter le développement d'un accident;
- 4) Les conditions latentes, c'est-à-dire les conditions qui ne sont pas apparentes, mais qui pourraient se manifester à tout moment, constituent la caractéristique la plus importante de ces modèles.

Alors que les modèles séquentiels supposent que la majorité des accidents sont dus à une erreur humaine, James Reason apporte la notion d'erreur organisationnelle (Larouzée, Guarnieri, & Besnard, 2014). Cette notion d'erreur organisationnelle suppose qu'un accident ne peut être uniquement relié à une erreur humaine, mais à une interaction entre plusieurs facteurs à différents niveaux organisationnels (Hardy, 2011).

C'est à la suite de l'étude de plusieurs accidents industriels entre 1979 et 1989 que Reason analyse la contribution de l'humain aux accidents industriels. Reason établit que la performance des employés de première ligne est étroitement liée aux conditions de travail (Larouzée et al., 2014). Ces conditions de travail sont définies par des décisions stratégiques des gestionnaires d'entreprises, d'où la notion d'erreur organisationnelle. Les constats de Reason corroborent les constats du sociologue Charles Perrow (Perrow, 1984) qui avaient déjà défini des bases de la réflexion sur la contribution humaine aux accidents industriels en décrivant les interactions complexes qui surviennent dans les systèmes socio-techniques (Larouzée et al., 2014).

Les travaux de Reason sont déterminants pour le milieu de la SST, tant au niveau de la modélisation des accidents du travail que dans la gestion des risques. L'aboutissement de ces travaux ont donné naissance à l'un des modèles les plus populaires et les plus utilisés, le modèle *Swiss Cheese*. Ce modèle est le résultat de travaux communs entre Reason et un ingénieur nucléaire, John Wreathall. Entre 1990 et 2000, Reason propose quatre versions de son modèle, ce qui démontre le caractère complexe de la compréhension du phénomène accidentel. L'intention première de Reason était de représenter l'accident comme la combinaison d'un ensemble de défaillances, tant organisationnelles, humaines que techniques (Larouzée et al., 2014).

Un des apports importants des travaux de Reason est que son modèle a permis de développer des outils d'analyse autant réactifs que proactifs. Entre autres, la compagnie Shell a financé le développement de la méthode Tripod Beta, basée sur le modèle de Reason, pour effectuer des

arbres de causes à la suite d'un accident (Larouzée et al., 2014). D'un point de vue proactif, des méthodes basées sur les principes du modèle de Reason ont été développées pour différents secteurs industriels (Larouzée et al., 2014).

Malgré sa contribution importante dans le domaine de la SST, le modèle organisationnel de Reason a reçu plusieurs critiques. Tout comme les modèles séquentiels, il donne une vision statique de l'organisation. Les *trous* présents dans le fromage sont en mouvement et se modifient constamment, ce qui laisse présager que le système socio-technique est plus dynamique que ce que le modèle propose (Qureshi, 2007). La simplicité de ce modèle a certainement contribué à sa grande popularité. Par contre, cette simplicité est empreinte de certaines lacunes. Luxhoj & Kauffeld (2003) soutiennent que le modèle ne représente pas de manière détaillée les interrelations entre les facteurs contributifs. Dans ce même ordre d'idées, Dekker mentionne (Larouzée et al., 2014):

The Swiss cheese analogy is useful to think about the complexity of failure *...+ but it does not explain: where the holes are or what they consist of, why the holes are there in the first place, why the holes change over time, both in size and location, how the holes get to line up to produce an accident. This is up to you, as investigator, to find out for your situation.

Bien que le modèle intègre plusieurs facteurs il n'en demeure pas moins qu'il représente une vision encore linéaire de l'accident du travail. Le modèle de Reason a permis d'amorcer un changement de paradigme en déplaçant la notion d'erreur humaine à une notion d'erreur organisationnelle. Depuis leur première publication et jusqu'à aujourd'hui, les travaux de Reason continuent de faire couler de l'encre dans la communauté scientifique. Plusieurs tentent d'y apporter des modifications pour les faire évoluer, alors que d'autres proposent une réingénierie du modèle (Louzèret, 2014). Quoi qu'il en soit, le modèle de Reason a été la prémisse à l'apparition de modèles systémiques et à l'importance de la contribution des facteurs organisationnels dans la survenue des accidents et dans la compréhension de ceux-ci.

La figure ci-dessous illustre le modèle dans sa version la plus simple. La ligne rouge démontre de quelle façon les *trous* dans le fromage peuvent s'aligner et ainsi conduire à un accident.

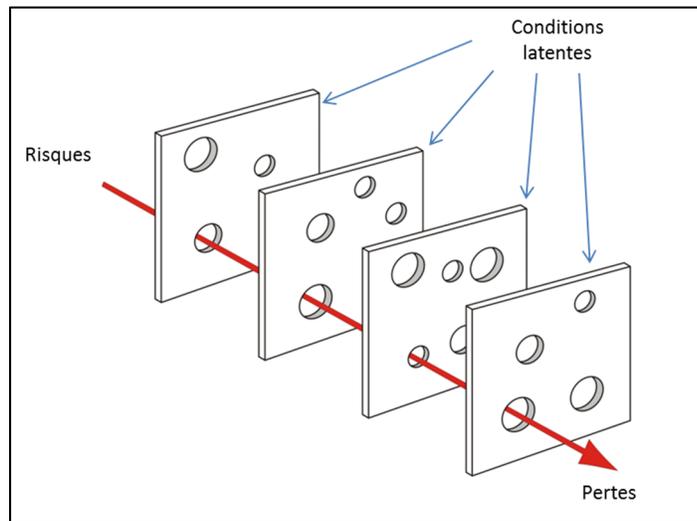


Figure 1.2 Modèle du fromage suisse

Les recherches sur les modèles d'accidents ont suscité beaucoup de questionnements sur la prévention des accidents. En même temps que les modèles d'accidents évoluaient, certaines méthodes d'évaluation et d'analyse des risques, dites plus proactives, étaient déjà utilisées dans certains secteurs industriels. Un consensus était établi à l'effet que des méthodes, telles que l'Hazard and Operability Study (HAZOP), l'analyse des modes de défaillance et de leur criticité (AMDEC) ou l'arbre des causes, étaient suffisantes pour assurer la sécurité d'une usine nucléaire (Hollnagel, 2014). Ces premières méthodes d'évaluation et d'analyse des risques marquent le début d'un virage important en matière de SST puisqu'elles s'inscrivent dans une démarche proactive visant l'anticipation des risques pouvant conduire à un accident.

En lien avec les nouvelles réalités des entreprises, de nouveaux modèles ont vu le jour. Ce sont les modèles d'accident systémiques. Parmi ces modèles, notons, entre autres, le System Theoretic Accident Model Process (STAMP) et le Functional Resonance Analysis method (FRAM). L'objectif de ces nouveaux modèles est de comprendre comment les systèmes fonctionnent pour concevoir des systèmes plus résilients, c'est-à-dire des systèmes capables

de faire face à des perturbations pouvant faire dévier le système vers un état vulnérable aux accidents de travail. Ces modèles tentent également de concevoir des systèmes de gestion de la SST capables de détecter cette déviation et de mettre en place des moyens de contrôle appropriés avant qu'un accident ne survienne (Carvalho, 2011).

Une approche systémique présente plusieurs avantages que les modèles séquentiels ou épidémiologiques ne possèdent pas (Belmonte, Schon, Heurley, & Capel, 2011).

- Elle permet une intégration plus complète du facteur humain et des aspects techniques de la sécurité;
- Elle envisage la sécurité comme une propriété émergente du système socio-technique;
- Elle considère que les accidents ne sont pas linéaires, mais plutôt issus d'une interaction dynamique entre les éléments le composant;
- Elle offre un échange complémentaire entre la gestion du risque et les facteurs humains et organisationnels.

Les modèles d'accidents systémiques définissent les accidents du travail comme un phénomène émergent qui survient à cause d'interactions complexes entre les composantes du système. Ces interactions peuvent mener à une dégradation de la performance du système ou résulter en un accident. La compréhension du fonctionnement du système est donc un élément essentiel pour toute analyse puisque ces modèles sont basés sur la théorie des systèmes. Cette théorie a été développée après la Deuxième Guerre mondiale pour faire face à l'importante augmentation de la complexité des systèmes, principalement les systèmes militaires.

Dans l'approche de la théorie des systèmes, les systèmes sont constitués de composantes qui interagissent, ce qui maintient un équilibre à travers une boucle de rétroaction d'information et de contrôle. Un système n'est pas statique, il est un processus dynamique qui s'adapte continuellement afin d'atteindre ses objectifs et réagir à ses propres changements ou à ceux de son environnement (Qureshi, 2008). Selon cette approche, les accidents sont le résultat de processus imparfaits impliquant des humains, des structures organisationnelles et sociales, des

activités d'ingénierie et de logistique du système (Qureshi, 2008). Cette approche a été la base de plusieurs travaux sur la modélisation des accidents. Parmi ceux-ci, notons les travaux de Rasmussen sur le développement d'un cadre socio-technique, l'approche de Leveson sur le System-Theoretic Accident Model and Process (STAMP) ainsi que le modèle Functional Resonance Analysis Method (FRAM) de Hollnagel.

Rasmussen

L'approche de Rasmussen est caractérisée par deux composantes permettant de répondre aux nouvelles exigences des systèmes socio-techniques modernes. Ces deux composantes sont la hiérarchie de la structure et la dynamique du système au fur et à mesure qu'il migre vers sa limite de sécurité. Elles sont gérées par des organisations évoluant dans des environnements extrêmement volatiles et dynamiques comme l'économie de marché, les pressions économiques et politiques, la réglementation ou l'augmentation de la prise de conscience sociale de la sécurité (Hardy, 2011), (Qureshi, 2008), (Rasmussen, 1997). Ces conditions ont fortement modifié le caractère dynamique de l'entreprise moderne en influençant les procédures de travail et le comportement humain dans l'exploitation des systèmes complexes (Rasmussen, 1997). L'approche systémique permet à Rasmussen de modéliser les structures opérationnelles, de gestion et organisationnelles susceptibles de créer des préconditions pour les accidents (Hardy, 2011), (Qureshi, 2008).

La figure 1.3 ci-dessous illustre le fonctionnement de la structure hiérarchique de Rasmussen. Dans le fonctionnement normal du système socio-technique, les décisions des niveaux supérieurs doivent descendre le long de la ligne hiérarchique vers les niveaux inférieurs. Parallèlement, les informations des niveaux inférieurs doivent remonter la hiérarchie. Ce double sens est primordial puisqu'il permet d'avoir une boucle de rétroaction complète et assure ainsi que le système est et demeure en équilibre.

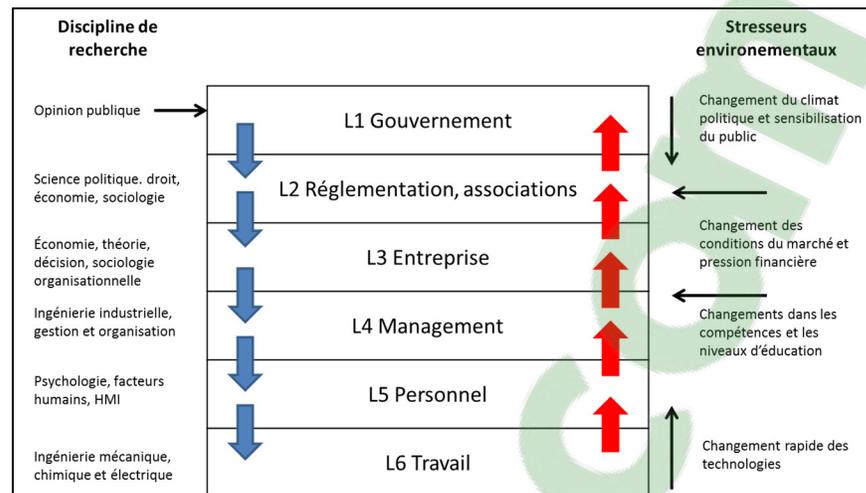


Figure 1.3 Structure hiérarchique
Adapté de Rasmussen, 1997

La deuxième composante du modèle de Rasmussen est la dynamique du système. Dans un environnement complexe, il n'est pas possible d'établir des procédures pour toutes les situations de haut niveau de risque ou de situations inattendues, en particulier en cas d'urgence (Rasmussen, 1997). Pour maintenir un niveau de sécurité dans les systèmes socio-techniques, il est essentiel que les décisions prises et les activités humaines demeurent dans les limites de travail définies par les contraintes administratives, fonctionnelles et de sécurité. Rasmussen souligne l'importance de définir des limites de sécurité et les influences dynamiques pouvant faire déplacer le système socio-technique vers ou en dehors de ces limites. De façon générale, il y a trois types de limites : une charge de travail individuelle acceptable, des contraintes financières et économiques acceptables et des procédures et une réglementation de sécurité. Chacune de ces limites est susceptible de produire un gradient qui pourrait influencer le système. Par exemple, une surcharge de travail crée un gradient qui pousse les individus à modifier leurs pratiques de travail pour réduire leur effort physique et cognitif ou à prendre des raccourcis pour être en mesure d'atteindre les objectifs fixés par l'entreprise. Ces gradients sont donc à l'origine d'une variation aléatoire des comportements humains. Après un certain temps, ces variations adaptatives de comportement poussent progressivement les travailleurs à

franchir les limites du système. Rasmussen soutient que cette tentative d'adaptation à des agents perturbateurs de l'environnement prépare, lentement mais sûrement, un état accidentel. Les travaux de Rasmussen ont fortement influencé les travaux sur les approches systémiques, entre autres les travaux de Leveson sur le développement du modèle d'accident STAMP (Systems-Theoretic Accident Model and Processes). Dans le modèle STAMP, la sécurité et la résilience sont traités comme des problèmes de contrôle. Les accidents ne surviennent pas à cause d'une défaillance d'une seule composante, mais plutôt à cause d'un contrôle inadéquat des contraintes liées à la sécurité dans le développement, la conception, la construction et l'opération d'un système socio-technique.

Leveson fait une nuance importante à propos de la notion de contrôle. La notion de contrôle dont il est question ne fait pas référence à un contrôle de coercition ou de dominance. Un comportement peut être contrôlé par une intervention directe de la direction, mais peut également être contrôlé de façon indirecte par des politiques, des procédures, des valeurs et d'autres aspects de la culture organisationnelle. Un comportement est influencé et partiellement contrôlé par le contexte social et organisationnel dans lequel le comportement se produit (Leveson, 2004).

Le modèle STAMP est basé sur trois concepts fondamentaux : les contraintes de sécurité, les structures de contrôle hiérarchique et les modèles de processus.

Les contraintes de sécurité – La composante fondamentale du modèle n'est pas un événement, mais plutôt une contrainte. Dans ce sens, les accidents sont le résultat d'une interaction parmi les composantes du système qui transgresse les contraintes de sécurité du système.

Les structures de contrôle hiérarchique – Un système possède deux structures de contrôle hiérarchique, une pour le développement du système et une autre pour l'exploitation du système, avec des interactions entre les deux. Entre chacun des niveaux hiérarchiques de chaque structure de contrôle, un chemin de communication efficace est nécessaire. Cette

boucle de rétroaction est primordiale puisque les systèmes sont en constant changement dans le temps.

Les modèles de processus – Tout agent de contrôle, qu'il soit humain ou automatisé, doit avoir une image du processus à contrôler. Les accidents sont souvent le résultat d'inconsistance entre le modèle de processus utilisé par le contrôleur et l'état actuel du processus.

Parce qu'il inclut des relations non linéaires, des relations indirectes et des boucles de rétroaction, le modèle STAMP permet de mieux gérer les niveaux de complexité et d'innovation technologique dans les systèmes d'aujourd'hui comparativement aux modèles plus traditionnels. Il en est de même pour le Functional Resonance Analysis Method (FRAM), une méthode d'analyse systémique qui a suscité et suscite encore l'intérêt de la communauté scientifique. Ce modèle est présenté plus en détails dans la section 1.2.2.2.

La compréhension et la connaissance de l'évolution en termes de modélisation des accidents de travail sont des éléments essentiels à notre problématique de recherche. La lecture des publications scientifiques permet de situer le caractère complexe de la compréhension et de l'anticipation d'un accident, laissant ainsi place à plusieurs questionnements sur une prévention efficace des accidents. À cet effet, tous les modèles, quels qu'ils soient, ont contribué à une meilleure compréhension des facteurs contributifs au phénomène accidentel. L'état d'avancement de la recherche sur le sujet a clairement démontré l'importance du système dans le processus accidentel, tel que démontré ci-dessus. En faisant une transposition avec les méthodes d'évaluation et d'analyse de risques utilisées dans le secteur manufacturier, il semble y avoir un écart entre les méthodes de gestion de risques utilisées dans le milieu manufacturier et les résultats des recherches.

La prochaine section traite principalement des méthodes utilisées en gestion de risques. L'objectif est de démontrer qu'il existe un écart entre les résultats des recherches des dernières années sur le processus accidentel et les méthodes utilisées dans le secteur manufacturier pour prévenir l'accident.

1.1.2 Vers un changement de paradigme en gestion de la SST

L'environnement dans lequel les entreprises d'aujourd'hui évoluent diffère considérablement de celui que nous avons connu au début du vingtième siècle. L'usine d'aujourd'hui fait face à des changements technologiques rapides et à une croissance de la concurrence mondiale qui la force à constamment améliorer ses performances. Les entreprises doivent revoir leur mode de production, ajuster leur mode de gestion pour rencontrer les nouvelles exigences des travailleurs qui entrent sur le marché du travail.

Comme cela a été présenté dans la section précédente, dans les années 1990, nous avons assisté à un changement concernant la façon de voir et de considérer le processus accidentel. L'arrivée des modèles systémiques et l'importance accordée au facteur humain dans la sécurité du système poussent maintenant les chercheurs à questionner les façons de faire traditionnelles en matière de gestion de risques.

La figure 1.4 ci-dessous résume l'évolution des courants de pensée au fil des ans. Cette évolution est divisée en quatre grandes périodes. Tout d'abord, l'ère des technologies, où les causes d'accidents étaient reliées à des défaillances techniques. Ensuite, l'ère des erreurs humaines, où les accidents étaient liés à la performance individuelle de l'humain. La troisième période est marquée par l'arrivée du concept de système socio-technique dans la période d'après-guerre, ce terme ayant été défini par Trist (1981) alors qu'il effectuait des études sur des travailleurs dans les mines de charbon au Tavistock Institute. Ce terme réfère à l'interaction entre l'humain et la technologie dans son milieu de travail. Selon cette approche, les accidents surviennent à cause d'une interaction socio-technique inappropriée. Ces modèles, qui intègrent les facteurs humains et organisationnels, permettent de mieux comprendre les situations de travail qui conditionnent l'activité humaine. Daniellou et al. (2010) définissent l'approche basée sur les facteurs humains comme une approche qui « consiste à identifier et à mettre en

place les conditions qui favorisent une contribution positive des opérateurs et des collectifs à la sécurité industrielle ».

Finalement, dans les années 2000 s'amorcent des recherches sur la résilience. La problématique est alors la vulnérabilité des entreprises face aux situations difficiles à anticiper, provenant, principalement, du manque de résilience des entreprises.

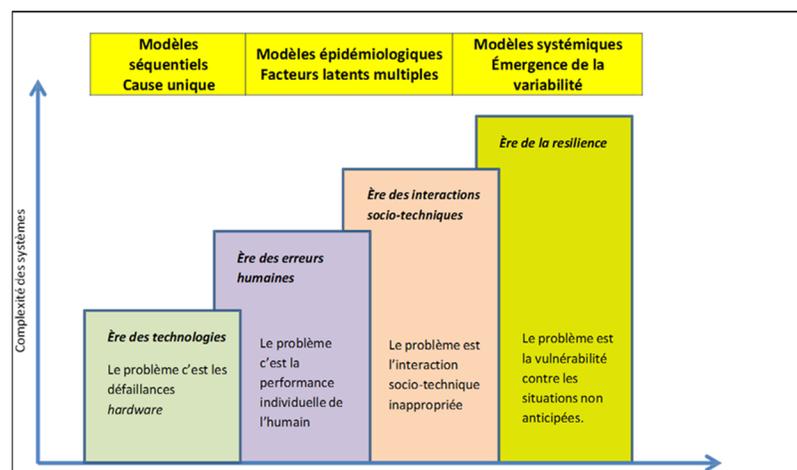


Figure 1.4 Évolution de la modélisation des accidents

1.1.2.1 Les systèmes de gestion de la SST

L'évolution en matière de modélisation des accidents du travail a donné lieu à divers questionnements concernant l'efficacité de ces techniques pour réellement prévenir les accidents du travail. Les changements dans l'acceptation sociale des accidents du travail et dans la réglementation ont forcé les entreprises à adopter des méthodes plus proactives. Comment identifier les risques avant que ceux-ci occasionnent des accidents? C'est là toute la portée de la mise sur pied des systèmes de gestion de la SST. Les systèmes de gestion de la SST visent à fournir un cadre aux entreprises afin de les aider à gérer les risques de manière proactive. Tous les systèmes de gestion de la SST s'inscrivent dans un cadre d'amélioration continue. Avoir un système de gestion du risque qui soit efficace est maintenant essentiel pour

les entreprises qui désirent rencontrer leurs obligations légales en matière de SST, mais également pour celles qui désirent avoir des résultats durables en prévention des accidents du travail. En ce sens, comme un système de gestion permet de gérer des risques, encore faut-il être en mesure de connaître ces risques.

La gestion traditionnelle de la SST misait sur la compréhension de l'accident du travail pour en prévenir la récurrence. Bien qu'il soit important de comprendre comment un accident est survenu, il n'en demeure pas moins que le prévenir avant qu'il survienne est d'une importance capitale. Dans cette foulée, plusieurs méthodes visant à prévenir les risques avant que l'accident survienne ont vu le jour. Ce tournant est lié à l'évolution des organisations, mais également à l'évolution de la société en général et de son niveau de tolérance de plus en plus faible concernant les accidents du travail. À la suite de différentes catastrophes industrielles, telles que l'accident de Three Mile Island, des exigences réglementaires de plus en plus sévères sont venues encadrer la sécurité industrielle. Ces nouvelles réglementations ont donné lieu à des politiques internes en matière de sécurité dans les grandes organisations et à la création de différents modèles et systèmes de gestion de la SST. Ces nouvelles mesures ont entraîné une diminution des accidents du travail (Daniellou et al., 2010) dans plusieurs secteurs industriels.

Malgré ces percées, le nombre de décès causés par un accident du travail ou par une maladie professionnelle augmente au Québec. Le tableau ci-dessous, tirée du rapport des activités de la CNESST pour l'année 2016, illustre cette situation.

Nombre de décès selon la catégorie de dossier et le sexe															
Catégorie de dossier	2012			2013			2014			2015			2016		
	F	H	Total	F	H	Total	F	H	Total	F	H	Total	F	H	Total
Accident du travail	4	71	75	10	53	63	5	52	57	7	62	69	7	73	80
Maladie professionnelle	2	134	136	7	114	121	2	105	107	6	121	127	7	130	137
Total	6	205	211	17	167	184	7	157	164	13	183	196	14	203	217

Figure 1.5 Nombre de décès selon la catégorie de dossier et le sexe
CNESST, 2017

En ce qui concerne le nombre de cas de lésions professionnelles, les chiffres diminuent sans toutefois montrer une diminution marquée. Ces données sont illustrées dans le tableau ci-dessous.

Événement	2012	2013	2014	2015	2016
Accidents du travail (dossiers ouverts)	101 197	98 916	97 890	97 461	96 857
acceptés ¹	85 523	83 458	82 321	81 765	82 179
autres	15 674	15 458	15 569	15 696	14 678
Maladies professionnelles (dossiers ouverts)	9 897	10 672	11 818	13 097	13 417
acceptés ¹	4 117	4 910	5 725	5 853	8 235
autres	5 780	5 762	6 093	7 244	5 182
Total (dossiers ouverts)	111 094	109 588	109 708	110 558	110 274
acceptés¹	89 640	88 368	88 046	87 618	90 414
autres	21 454	21 220	21 662	22 940	19 860

Figure 1.6 Nombre de cas de lésions professionnelles
CNESST, 2017

Les statistiques ci-dessus démontrent que la réglementation et l'implantation de systèmes de gestion de la SST ne sont pas suffisantes pour répondre aux besoins des entreprises. Plusieurs raisons peuvent expliquer cela. Selon Daniellou (2010), cela s'expliquerait par deux principaux éléments : d'une part, par un déséquilibre entre la recherche de responsabilités reliées au comportement humain (des opérateurs) et des questionnements sur la contribution de l'organisation et de la gestion et d'autre part, par la faible attention portée aux situations réellement vécues par les employés pourrait également expliquer ce déséquilibre.

1.1.2.2 Processus de gestion du risque

Pour être efficace, un système de gestion de la SST doit reposer sur un processus de gestion du risque rigoureux. En 2008, l'Organisation internationale de normalisation (ISO) a publié une norme visant à fournir des principes et des lignes directrices en gestion des risques et des processus de mise en œuvre aux niveaux stratégique et opérationnel. Cette norme ne vise pas à uniformiser la gestion du risque au sein des entreprises, mais plutôt à harmoniser les approches et de standardiser les méthodologies de gestion des risques. La figure ci-dessous

illustre le processus global de gestion du risque défini dans la ISO 31001 (Organisation internationale de normalisation, 2018a).

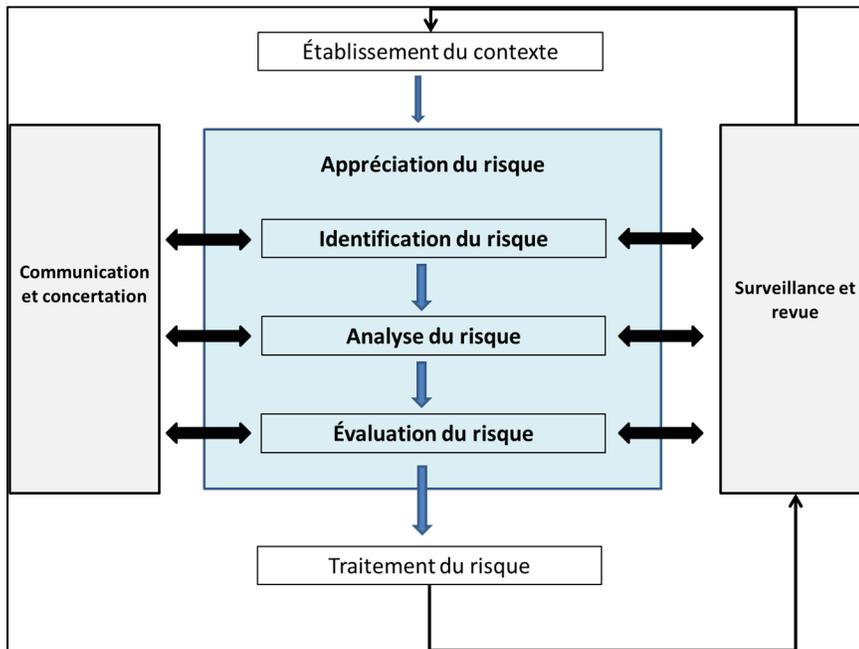


Figure 1.7 Processus global de gestion du risque
Adapté de ISO 31001

Par définition, le risque est la combinaison de deux facteurs : la probabilité d'occurrence d'un évènement et sa conséquence. Il existe plusieurs méthodes d'appréciation du risque utilisées dans le milieu industriel. Tel qu'illustré dans la figure 1.8, la démarche d'appréciation du risque est composée de trois étapes : identification du risque, analyse du risque et évaluation du risque. La première étape, soit l'identification du risque, est fondamentale pour assurer un système sécuritaire. La deuxième étape, l'analyse du risque, sera déterminante dans la mise en place des mesures de contrôle. L'analyse du risque étudie les conditions d'exposition des travailleurs aux risques identifiés dans l'entreprise. Le succès d'une méthode complète d'appréciation du risque réside dans sa capacité à identifier les risques et subséquentement à analyser les différents scénarios pouvant causer un accident selon différents degrés de gravité. Finalement, l'évaluation du risque permet de définir la criticité de chacun des risques pour y

apporter des actions correctives et préventives. Elle permet également la hiérarchisation des risques.

Une des méthodes d'appréciation du risque les plus populaires dans le secteur manufacturier est l'Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité (AMDEC). Cette méthode est classée dans la catégorie de la sûreté de fonctionnement, c'est-à-dire une méthode capable de caractériser les modes de défaillances d'un système (Legendre, 2017). L'objectif des méthodes de sûreté de fonctionnement est de s'assurer que le système est en mesure de remplir une ou plusieurs fonctions requises dans des conditions données. On y retrouve quatre éléments importants, soit la fiabilité, la maintenabilité, la disponibilité et la sécurité.

Cette méthode a été développée aux États-Unis, dans les années 1960, sous le nom de AMDE (Analyse des modes de défaillance et de leurs effets). Ensuite, elle a été mise au point par la NASA et le secteur de l'armement sous le nom d'AMDEC, en y ajoutant la notion de criticité. À la fin des années 1970, la méthode a été largement reprise par l'industrie automobile, notamment par Toyota, Nissan, Ford, BMW, Peugeot, Volvo et Chrysler (Kélada, 1994). Plus tard, la méthode a fait ses preuves dans plusieurs autres industries à travers le monde.

L'AMDEC est une « méthode inductive qui permet de réaliser une analyse qualitative et quantitative de la fiabilité ou de la sécurité d'un système » (Landry, 2011). La méthode consiste donc à examiner chacune des défaillances potentielles d'un système, leurs causes et leurs conséquences sur le fonctionnement du système. Elle permet ensuite de hiérarchiser les défaillances potentielles en estimant le niveau de risque de défaillance. Dans un processus global de gestion des risques, l'AMDEC permet d'identifier les risques et dangers, de les analyser et ensuite de les évaluer selon des critères tels que la gravité potentielle du dommage, la probabilité d'occurrence et la criticité.

L'AMDEC peut être utilisée dans différents processus au sein de l'entreprise et à différents niveaux. Le tableau 1.1 ci-dessous synthétise les principales utilisations de l'AMDEC.

Tableau 1.1 Types d'AMDEC
Adapté de Kélada, 1994

Types d'AMDEC	Description
AMDEC organisation	Est utilisé pour analyser les différents niveaux de processus d'affaires : système de gestion, système d'information, systèmes de production, etc.
AMDEC produit	Permet d'étudier en détails la phase de conception d'un produit.
AMDEC processus	Utilisé pour l'analyse des processus de fabrication.
AMDEC moyen	Concerne les machines, les outils, les équipements et les appareils de mesure, des logiciels et les systèmes de transport interne.
AMDEC service	Analyse si le service donné correspond aux attentes des clients et que le processus permettant de réaliser le service n'engendre pas de défaillance pouvant compromettre le service aux clients.
AMDEC sécurité	S'applique pour assurer la sécurité des opérateurs dans les procédés où il existe des risques pour ceux-ci.

Plusieurs études ont porté sur la modification de la méthode afin de combler certaines des lacunes de l'AMDEC (Liu, Liu, & Liu, 2013; Rhee & Ishii, 2003; Subburaman, 2010; Barsky & Dutta, 1997; Village, Annett, Lin, Greig, & Neumann, 2011; Berthe & Vimeux, 1997). La principale limite de la méthode vient du fait que l'AMDEC considère rarement le facteur humain et, lorsque celui-ci est pris en compte dans l'analyse, il est considéré comme une source potentielle de défaillance (Lux et al., 2016). En ce sens, dans une étude portant sur l'AMDEC, Lux et al. (2016) proposent une modification à la méthode en y ajoutant un critère d'analyse supplémentaire relié aux situations réelles de travail.

Les études portant sur le sujet démontrent bien le besoin d'élargir les méthodes actuelles afin qu'elles soient mieux adaptées à la réalité des entreprises d'aujourd'hui. Ces études démontrent que nous arrivons à la croisée des chemins en ce qui concerne la gestion de la SST. Le paradigme historique en gestion de la SST qui prévalait jusqu'à la fin des années 1980 gérait la SST de façon cloisonnée et distincte de la gestion des opérations. Le critère de performance était mis sur la réduction des accidents du travail (Carrière et al., 2006). Il est alors légitime de se poser la question suivante : Est-ce qu'une entreprise ayant un faible taux d'accidents est une entreprise sécuritaire? Selon Carrière et al. (2006), un changement de paradigme doit s'amorcer et s'effectuer autour d'une gestion intégrée de la SST, une gestion de la SST qui soit systématisée, ayant comme objectif la mise sur pied de bonnes pratiques et des critères de performance liés à la prévention des accidents, c'est-à-dire des indicateurs qui soient étroitement liés au niveau réel de sécurité de l'entreprise.

1.1.2.3 Les risques émergents

Les organisations et les travailleurs sont confrontés à des risques qui évoluent en fonction des circonstances et des modifications de l'environnement de travail. Ces risques sont appelés émergents. En ce sens, la problématique des risques émergents en SST est un sujet d'actualité dans le domaine de la recherche en SST depuis plusieurs années. Cet intérêt envers ces risques est lié aux changements rapides que connaît la société et plus spécifiquement le milieu de travail. Les questions que soulèvent ces risques émergents sont telles qu'il s'agit d'un champ d'intérêt marqué pour l'Agence européenne pour la santé et la sécurité au travail (EU-OSHA). L'un des principaux objectifs de l'EU-OSHA est d'identifier les risques nouveaux et émergents de SST pour fournir des données justes sur ces risques. Elle vise à répondre aux besoins des décideurs politiques et des chercheurs en leur permettant de prendre des mesures plus efficaces pour la gestion de ces risques (<https://osha.europa.eu/fr/emerging-risks>).

Il convient alors de bien définir la notion de risque émergent puisqu'il s'agit d'un élément majeur de notre problématique de recherche. Un risque émergent « concerne des situations

pouvant induire des nouveaux risques (nouvelles technologies, nouvelles populations exposées) et pour lesquels les effets sur la santé ne sont pas toujours connus » (<http://www.camip.info/colloques-congres/comptes-rendus/archives/Archives-2012/32e-congres-national-de-medecine/Risques-emergents-communications>). Plus spécifiquement, EU-OSHA (2005) définit un risque émergent comme tout risque de SST qui est nouveau et croissant. Un risque est considéré nouveau s'il était inconnu auparavant, qu'il soit causé par des nouveaux processus, des nouvelles technologies, des nouveaux environnements de travail ou simplement par un changement social ou organisationnel. Le risque peut être considéré comme nouveau également si des changements dans les perceptions sociales ou publiques soulèvent une question de longue date. Finalement, les nouvelles connaissances scientifiques peuvent être à l'origine d'un nouveau risque. Un risque est considéré comme croissant si le nombre de dangers qui mène au risque augmente, si la probabilité d'exposition au danger augmente ou si l'effet du danger sur la santé des travailleurs s'aggrave.

Les questions relatives aux risques émergents en matière de SST intéressent les chercheurs depuis plusieurs années. Les nouvelles technologies sont un exemple de ces risques émergents. Par exemple, plusieurs études portent sur les effets de la nanotechnologie et des nanomatériaux sur la santé des travailleurs (Ostiguy et al., 2008). D'autres exemples sont reliés aux risques chimiques à cause du développement de nouveaux produits chimiques. La vitesse à laquelle ces nouvelles technologies arrivent sur le marché du travail est si grande qu'il est difficile de prévoir les effets sur la SST des travailleurs avant même qu'ils soient en utilisation dans les milieux de travail. Il existe également d'autres catégories de risques émergents reliés aux nouvelles tendances en matière d'emploi ou des risques psychosociaux. Ces types de risques peuvent également émerger en raison des changements dans les modes de production ou en raison de la concurrence internationale. Finalement, des risques émergents peuvent être reliés aux nouvelles méthodes de gestion de la production, par exemple les systèmes de production LEAN peuvent apporter des risques de nature organisationnelle pour lesquels les impacts sur la SST des travailleurs n'ont pas été considérés et mesurés.

1.1.2.4 Les limites des méthodes actuelles

À la lumière de ce qui précède, il en ressort plusieurs lacunes au niveau des méthodes d'appréciation du risque (OCDE) :

- Les méthodes actuelles sont parfois éloignées des conditions de travail réelles des travailleurs. Bien souvent, les modèles établissent une chronologie d'évènements du passé plutôt qu'une évaluation de l'interrelation entre les composantes du système socio-technique. Ces interdépendances peuvent influencer le risque en amont. Étant donné que le système est en mouvement et en constante évolution, l'expérience passée peut induire en erreur en tenant pour acquis que le passé est garant du futur.
- La plupart des modèles établissent une relation plus ou moins linéaire entre une cause et un effet. Ils sont donc limités pour expliquer et comprendre les phénomènes complexes.
- Les conséquences à long terme et les répercussions en dehors du système étudié ne sont pas considérées.
- Les méthodes existantes font souvent abstraction des facteurs humains, principalement à cause de la difficulté à en quantifier les données.

La complexité des systèmes socio-techniques et de leur environnement d'aujourd'hui rend la tâche difficile en ce qui a trait à l'appréciation des risques. En se voulant proactif, le processus de gestion des risques est essentiellement basé sur l'incertitude, c'est-à-dire sur ce qui est imprévisible. L'ISO a d'ailleurs modifié sa définition du terme risque en laissant tomber la vision de l'ingénieur du risque pour relier la définition aux objectifs de l'organisation. La définition du risque est ainsi devenue « l'effet de l'incertitude sur les objectifs de l'entreprise » (ISO, Guide 73 – Vocabulaire du management du risque). Dans la nouvelle norme ISO 45001 sur les systèmes de gestion de la SST, publiée en mars 2018, le risque y est défini comme l'effet de l'incertitude.

Il ne fait plus de doute que la gestion traditionnelle de la SST basée sur les relations linéaires entre une cause et ses effets sont choses du passé. Les organisations doivent maintenant

apprendre à gérer des risques systémiques, bien souvent émergents, qui créent de l'incertitude et des perturbations au sein de leur système. Malgré les modifications apportées à plusieurs méthodes dites traditionnelles pour tenter de les rendre plus réalistes avec l'entreprise d'aujourd'hui, il y a lieu d'amorcer un virage dans la façon de voir et de comprendre la sécurité industrielle.

La prochaine section traite d'un nouveau paradigme en gestion de la SST, soit l'ingénierie de la résilience. Ce concept reconsidère la façon traditionnelle de gérer la SST.

1.2 L'ingénierie de la résilience

À la lumière de ce qui précède, plusieurs questions émergent sur les méthodes et pratiques en matière de gestion de la SST et plus spécifiquement en termes de gestion globale des risques. La prochaine section présente une approche différente en gestion de la SST basée sur le concept de la résilience. D'abord, il sera question de définir le concept de résilience. La deuxième section traite plus spécifiquement de l'ingénierie de la résilience comme nouveau paradigme en gestion de la SST. Ensuite, nous aborderons l'élément central de l'ingénierie de la résilience, soit la variabilité de la performance. Finalement, nous présenterons une méthode d'analyse de risques basée sur les principes de l'ingénierie de la résilience.

1.2.1 Les théories de la résilience

Le terme résilience est utilisé dans plusieurs domaines comme, entre autres, l'ingénierie des matériaux, la psychologie, la physiologie et la sociologie. Ce mot tire son étymologie des racines latines des mots *re*, qui signifie en arrière, et de *salire*, qui signifie sauter. La résilience est un terme utilisé afin de décrire les phénomènes où un système est soumis à un déséquilibre et vise à retrouver une situation équilibrée.

En psychologie et en sociologie, la résilience est attribuée à un individu. La résilience individuelle se manifeste lorsqu'un individu fait face à des épreuves ou à des traumatismes. Plusieurs travaux ont été effectués sur la résilience individuelle, notamment ceux de la psychologue Werner (Rigaud, 2011) qui a porté sur un groupe d'environ 700 enfants vivant sur une île d'Hawaii. De ce groupe, la chercheuse a suivi les développements physique, intellectuel et psychosocial de 200 enfants ayant vécu un ou des traumatismes dans leur enfance. Un tiers d'entre eux se sont bien développés et sont devenus des adultes épanouis. Le concept de résilience a alors été utilisé pour les caractériser.

Depuis quelques années, le terme de la résilience s'associe de plus en plus aux organisations. Plusieurs travaux ont porté sur la résilience organisationnelle. Au Québec, par exemple, le concept de la résilience organisationnelle a été utilisé à la suite de différents événements qui ont perturbé le fonctionnement normal de plusieurs organisations. Des événements comme le verglas de 1998 au Québec ou la panne électrique en août 2003, qui a touché près de 50 millions de personnes dans l'Est et le Midwest américains ainsi qu'en Ontario, ont fait prendre conscience aux gouvernements qu'il était devenu primordial de développer une culture de la résilience au sein des organisations (Robert et al, 2009). Plus récemment, la tragédie de Lac-Mégantic, en juillet 2013, a mis à rude épreuve la résilience de plusieurs paliers de gouvernement et de plusieurs autres organisations.

Le Centre risque & performance de la polytechnique de Montréal (2009) a mené une étude sur les différents concepts de la résilience organisationnelle et a défini la résilience organisationnelle comme étant la capacité « d'un système à maintenir ou à rétablir un niveau de fonctionnement acceptable malgré des perturbations ou des défaillances ». Trois concepts clés sont retenus dans cette définition. Dans un premier temps, le concept de *système* fait référence au fait que l'organisation est vue selon une approche système. Deuxièmement, la notion de *Malgré des perturbations ou des défaillances* signifie qu'une acceptabilité et une caractérisation des perturbations, voire des défaillances du système, sont nécessaires.

Finalement, le concept de *capacité à maintenir ou à rétablir* signifie que, devant des perturbations, le système adapte ses modes de gestion pour être plus résilient.

Dans le même ordre d'idées, le développement du concept de l'ingénierie de la résilience fait suite à plusieurs catastrophes industrielles qui ont eu des impacts considérables. Notons, par exemple, l'accident de la fusée Challenger, l'accident nucléaire de Three Mile Island ou encore l'explosion de Bhopal.

1.2.2 L'ingénierie de la résilience

En 2004, un Symposium (Macchi, 2010) a été tenu sur l'ingénierie de la résilience. Ce symposium regroupait des chercheurs en sécurité et des praticiens du milieu. La motivation derrière le développement du concept de l'ingénierie de la résilience vient du besoin de trouver une façon novatrice de gérer les risques dans les systèmes socio-techniques d'aujourd'hui (Macchi, 2010). L'environnement dans lequel évoluent les organisations d'aujourd'hui crée des risques émergents où la notion de causalité entre un événement et sa cause ne peut plus être expliquée que par des relations simples et linéaires. L'ingénierie de la résilience s'intéresse donc aux aspects d'incertitude et d'émergence des risques. Le concept de l'ingénierie de la résilience s'appuie sur quatre fondements (Rigaud, 2011) :

- 1) La gestion de la SST ne peut être fondée uniquement sur la connaissance des événements du passé et du calcul de la probabilité de défaillances du système. La gestion de la sécurité doit être à la fois réactive et proactive;
- 2) La description des activités est toujours sous-spécifiée. Les individus et les organisations doivent ajuster leur fonctionnement pour correspondre à ce qui leur est demandé en tenant compte des ressources disponibles. Dans la mesure où les ressources et le temps sont limités, ces ajustements sont inévitablement approximatifs;
- 3) Les événements porteurs de dommages peuvent être attribués à des défaillances ou à des mauvais fonctionnements des composantes d'un système alors que d'autres, non. Ces

- derniers peuvent être le fruit de la combinaison de la variabilité normale des fonctions du système;
- 4) La gestion de la sécurité ne peut être séparée des enjeux fondamentaux des activités d'opération telles que la productivité et la rentabilité. La sécurité est un prérequis de la productivité et de la rentabilité et vice-versa. La sécurité ne doit donc pas être abordée comme une contrainte, mais comme un facteur d'amélioration.

Un système résilient est défini par son habileté à ajuster son fonctionnement avant, pendant et après des changements et des perturbations, de sorte qu'il puisse continuer à fonctionner même après un incident majeur ou en présence d'une perturbation continue. Un système résilient accepte la présence constante d'un malaise et reste sensible à la possibilité d'une défaillance (Hollnagel, 2011). Selon Hollnagel, pour être résilient, un système doit posséder quatre caractéristiques (Hollnagel, 2011) :

- 1) Un système résilient doit être capable de répondre aux menaces régulières et irrégulières d'une manière robuste et flexible. Il n'est pas suffisant d'avoir des réponses toutes prêtes en main puisque les situations actuelles ne concordent bien souvent pas avec les situations attendues. La seule exception pourrait être lors des opérations routinières;
- 2) Un système résilient doit être capable de surveiller ce qui se passe, incluant sa propre performance. La flexibilité signifie que la surveillance doit être évaluée en temps réel pour éviter d'être pris par la routine ou les habitudes. La surveillance permet au système de faire face à ce qui est ou pourrait devenir critique dans un futur rapproché;
- 3) Un système résilient doit être capable d'anticiper les défaillances et les pressions ainsi que leurs conséquences. Cela veut dire d'avoir la capacité de regarder au-delà de la situation actuelle et future et de prendre en considération ce qui pourrait se produire à moyen et à long terme. Il s'agit ici de l'habileté à gérer les menaces irrégulières. L'anticipation permet au système de faire face au potentiel;
- 4) Finalement, un système résilient doit pouvoir apprendre de ses expériences. L'apprentissage permet à l'organisation de faire face au factuel, c'est-à-dire d'apprendre selon les faits.

La mise en place des principes de l'ingénierie de la résilience nécessite de revoir de quelle façon nous gérons la SST et, de ce fait, les risques. Adopter une vision selon ces principes ne signifie pas de remettre en question les pratiques traditionnelles. L'ingénierie de la résilience est une méthode de gestion complémentaire aux approches traditionnelles. Selon Daniellou et al. (2010), la sécurité industrielle serait l'équation de deux types de sécurité : la sécurité réglée et la sécurité gérée. La sécurité réglée réfère aux aspects techniques, aux normes, aux réglementations et aux systèmes de gestion de la SST, bref tout ce qui peut être prévisible dans le système. La sécurité gérée réfère aux concepts d'imprévisibilité et d'incertitude auxquels les entreprises sont confrontées, soit la résilience du système.

Dans cette optique, les deux approches sont complémentaires tout en étant différentes. Hollnagel (2014) présente les principales différences entre les approches traditionnelles en gestion de la SST et l'approche basée sur l'ingénierie de la résilience. Le tableau ci-dessous illustre de manière synthétisée ces différences selon cinq (5) éléments soit : la définition de la sécurité, c'est-à-dire comment est considéré la sécurité selon l'approche; le principe sur lequel la gestion de la SST s'appuie; l'explication des accidents, c'est-à-dire comment les accidents surviennent; l'attitude pour le facteur humain; finalement, le rôle de la variabilité de la performance.

Tableau 1.2 Distinction entre les approches traditionnelles et l'ingénierie de la résilience
Adapté de Hollnagel, 2014

	Approche traditionnelle	Ingénierie de la résilience
Définition de la sécurité	Le moins de choses possible doit mal fonctionner.	Le plus de choses possible doit bien fonctionner.
Principe de gestion de la sécurité	Réactif, répondre lorsque quelque chose ne s'est pas bien passé ou est catégorisé comme un risque inacceptable.	Proactif, essayer d'anticiper continuellement les développements et les événements.

Explication des accidents	Les accidents sont causés par une défaillance et un mauvais fonctionnement. L'objectif d'une enquête est d'identifier les causes et les facteurs contributifs.	Les choses se produisent dans le même sens, peu importe le résultat. L'objectif d'une enquête est de comprendre comment les choses se passent habituellement bien pour expliquer comment les choses peuvent occasionnellement mal se passer.
Attitude pour le facteur humain	Les humains sont principalement considérés comme un risque ou un handicap.	Les humains sont considérés comme une ressource nécessaire pour la flexibilité et la résilience du système.
Rôle de la variabilité de la performance	Nuisible, devrait être évité le plus possible.	Inévitable, mais également utile. Devrait être surveillé et géré.

Dans la prochaine section, nous abordons l'élément central de l'ingénierie de la résilience, soit la variabilité de la performance.

1.2.2.1 La variabilité de la performance

L'humain, et son comportement, fait partie intégrante du système socio-technique, ce qui en fait un élément important dans l'analyse des risques. La variabilité de la performance de l'humain est au cœur même de l'ingénierie de la résilience. Lorsqu'un travailleur est placé dans un environnement de travail, il se retrouve dans une situation de travail qui peut être influencée par différents éléments du système, par exemple ses caractéristiques personnelles telles que son âge, son sexe, ses caractéristiques physiques et même l'état actuel dans lequel il se trouve au moment de faire son travail. Sa situation de travail peut aussi être influencée par les objectifs à atteindre, les caractéristiques organisationnelles, c'est-à-dire le cadre de travail

dans lequel il effectue son travail. La variabilité de performance, qui est influencée par tous ces éléments, est au cœur du concept d'ingénierie de la résilience.

Les humains varient leur performance pour atteindre les résultats demandés. Cette variabilité de performance est inévitable et nécessaire pour plusieurs raisons. Entre autres, les humains apprennent à surmonter les lacunes inévitables causées par les défauts de conception et les défauts fonctionnels de l'organisation. Ils peuvent également ajuster leur performance afin de rencontrer les demandes dans une situation donnée. Les humains interprètent les procédures et les mettent en application pour s'adapter aux conditions ponctuelles auxquelles ils font face. Finalement, les humains peuvent détecter quelque chose qui ne fonctionne pas correctement et, ainsi, dans bien des cas, corriger ce dysfonctionnement en ajustant leur façon de faire (Hollnagel, 2011).

La variabilité de la performance peut mener à des résultats positifs ou non souhaités. La figure ci-dessous illustre de quelle façon cela peut survenir.

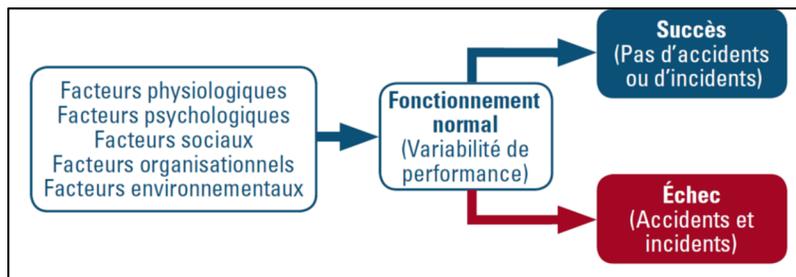


Figure 1.8 Variabilité de la performance
Adapté de Hollnagel, 2011

L'interaction de l'ensemble des facteurs psychologiques, environnementaux, physiologiques, sociaux et organisationnels fait en sorte que la variabilité de la performance de l'humain dans le système est considérée normale au sein du système. L'ingénierie de la résilience propose de comprendre les caractéristiques normales de la variabilité de la performance et plus

spécifiquement comment les facteurs internes et externes peuvent affecter l'ampleur et la nature de cette variabilité (Hollnagel, 2011) pour ainsi être en mesure de mieux les gérer.

Compte tenu de l'importance de considérer la variabilité de la performance comme un élément essentiel au bon fonctionnement du système, il devient essentiel pour les entreprises d'aujourd'hui d'avoir recours à des processus d'appréciation des risques qui soient plus représentatifs de leurs enjeux actuels. Pourtant, la plupart des modèles existants n'en tiennent pas compte de manière explicite. Les effets des modifications de comportement, à cause, entre autres, des perceptions du risque, ne sont pas pris en compte, ce qui peut entraîner d'importants biais en analyse des risques. Considérant cela, une méthode d'analyse des risques, selon l'ingénierie de la résilience, doit satisfaire quatre exigences (Macchi, 2010).

- 1) L'ingénierie de la résilience nécessite l'adoption d'une méthode qui soit systémique. L'analyse de la sécurité dans une organisation ne peut pas se limiter à un seul élément du système socio-technique, mais doit bien considérer l'organisation comme un tout;
- 2) L'ingénierie de la résilience nécessite une méthode qui soit en mesure de modéliser le fonctionnement normal du système socio-technique. La plupart des modèles utilisés dans les organisations d'aujourd'hui se concentrent sur l'identification d'une défaillance possible ou d'un accident. Dans la perspective de l'ingénierie de la résilience, c'est le fonctionnement normal du système qui peut être la source soit d'un succès, soit d'une défaillance;
- 3) L'ingénierie de la résilience nécessite une méthode qui puisse voir les accidents et la sécurité comme un phénomène émergent résultant du fonctionnement normal du système socio-technique;
- 4) L'ingénierie de la résilience nécessite une méthode capable de prendre en considération la performance de l'humain, non pas d'une manière nominale ou standardisée, mais plutôt d'une manière qui décrit la variabilité de la performance comme l'expression d'un ajustement constant que l'humain fait dans son travail quotidien. De ce fait, il est nécessaire de connaître la contribution positive de la sécurité que les humains apportent à l'organisation.

Considérant ces caractéristiques, Hollnagel a développé une nouvelle approche en analyse du risque basée sur les principes de l'ingénierie de la résilience. Il s'agit du Functional Resonance Analysis Method (FRAM), dont il sera question dans la prochaine section.

1.2.2.2 Le Functional Resonance Analysis Method (FRAM)

Le FRAM a été développé par Erik Hollnagel. La méthode FRAM décrit le système socio-technique par ses fonctions et ses activités plutôt que par sa structure. Plutôt que de tenter de comprendre pourquoi les fonctions individuelles et les actions peuvent échouer, le FRAM se concentre sur comment les conditions pouvant mener à un accident émergent. L'objectif du modèle FRAM est de représenter la dynamique du système en modélisant les dépendances non linéaires par une représentation de la performance des fonctions et des activités. Cette dépendance repose sur le concept de la résonance fonctionnelle, concept que Hollnagel a emprunté à la physique ondulatoire faisant référence à la résonance stochastique. La résonance stochastique est un concept qui définit l'accroissement d'un phénomène de vibration qui aura des répercussions en aval dans le système. La résonance fonctionnelle vise donc à comprendre comment la variabilité d'une fonction aura des répercussions sur d'autres fonctions du système. Le FRAM repose sur quatre principes :

- Principe d'équivalence: Hypothèse selon laquelle différents types de conséquences ne requièrent pas nécessairement différents types de causes, mais que la même explication peut être utilisée dans la plupart des cas;
- Principe d'ajustement approximatif: Hypothèse selon laquelle les individus ajustent continuellement ce qu'ils font pour que les actions concordent avec les conditions dans lesquelles elles sont réalisées;
- Principe d'émergence: Reconnaissance à l'effet que tous les résultats ne peuvent être expliqués par le fait d'une cause identifiable et spécifique;

- Principe de la résonance: Dans les situations où il n'est pas possible ou raisonnable d'utiliser la relation de cause à effet comme explication d'un évènement, la résonance fonctionnelle doit être utilisée pour expliquer les relations non linéaires et les résultats qui en découlent.

Le modèle FRAM est composé de plusieurs fonctions qui composent l'ensemble du système. Ces fonctions sont graphiquement illustrées par un hexagone auquel se rattache les six aspects de la fonction.

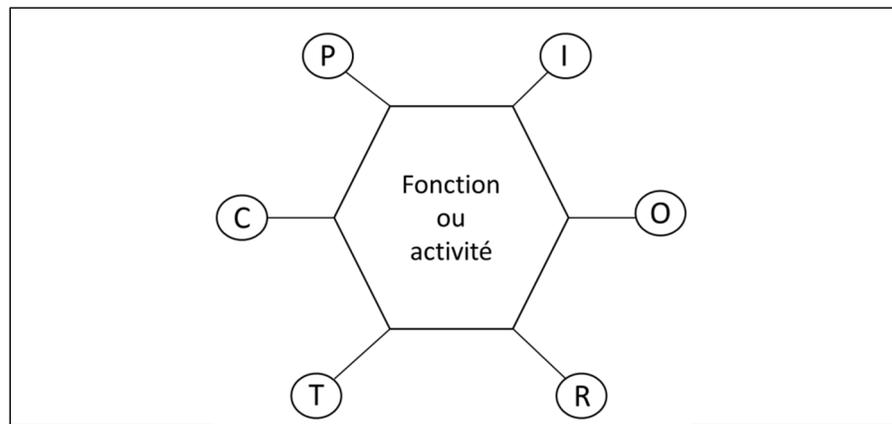


Figure 1.9 Représentation graphique d'une fonction selon le FRAM
Adapté de Hollnagel, 2014

Les six aspects qui définissent les fonctions sont définis de la façon suivante :

Entrée (I) : La ou les entrées de la fonction. Elles constituent le lien avec les fonctions précédentes et peuvent être soit transformées ou utilisées par la fonction avant de produire un extrant.

Sortie (O) : La ou les sorties de la fonction. Elles constituent le lien avec les fonctions subséquentes.

Ressource (R) : La ou les ressources nécessaires au traitement de la fonction en termes de procédures, de main-d'œuvre, d'énergie, etc.

Temps (T) : Le temps nécessaire à la réalisation de la fonction. Le temps peut également être une contrainte dans le sens où chaque activité peut avoir une fenêtre de temps spécifique pour être réalisée.

Contrôle (C) : Représente le ou les contrôles et contraintes qui supervisent ou restreignent l'exécution de la fonction. Le contrôle peut être une fonction active ou simplement des plans, des procédures et des lignes directrices.

Précondition (P) : Représente les éléments qui doivent nécessairement être satisfaits pour que la fonction puisse être réalisée. Une étape doit être complétée ou une condition spécifique du système doit être remplie avant de passer à l'autre étape.

Le Functional Resonance Analysis Method (FRAM) est une méthode basée sur les principes de l'ingénierie de la résilience visant à fournir une approche pratique pour décrire et analyser les comportements émergents des systèmes socio-techniques complexes (Rosa, Haddad, & Carvalho, 2015). Il a été démontré dans les sections ci-dessus qu'il est pertinent de questionner les méthodes actuellement utilisées en gestion de la SST pour identifier les risques émergents des entreprises d'aujourd'hui. C'est dans cette optique que le FRAM a été développé. De plus, il peut être utilisé comme méthode proactive d'analyse des risques ou pour mieux comprendre comment un système peut se comporter dans sa phase de conception (Hollnagel, 2004).

Depuis qu'il a été développé, le FRAM a donné lieu à diverses applications dans différents secteurs. Les secteurs dans lesquels le FRAM a été utilisé sont des secteurs considérés à haut niveau de risque et dans lesquels l'apport de l'humain pour le maintien de la sécurité est important, par exemple dans le secteur du trafic aérien européen (Tian, Wu, Yang, & Zhao, 2016) ainsi que dans le secteur pétrochimique (Tian et al., 2016). Entre autres, la méthode a été utilisée pour analyser la performance des opérations de dégivrage des avions à la suite d'un accident aérien (Slim et al., 2018a). Cette méthode prend également de l'expansion dans le secteur hospitalier européen. La méthode FRAM a été utilisée spécifiquement dans les centres hospitaliers du Sud du Danemark (Hollnagel, 2014). Les résultats obtenus avec le FRAM ont démontré que la méthode apporte une complémentarité aux méthodes déjà existantes puisque les méthodes traditionnelles ne sont pas suffisantes pour une compréhension approfondie des systèmes complexes d'aujourd'hui (Leveson, 2011).

Bien que le FRAM ait surtout été utilisé dans l'analyse de systèmes complexes dans un objectif de sécurité, il y a un intérêt grandissant pour l'utilisation de cette méthode en dehors du domaine de la SST. Entre autres, Slim et al. (2018b) ont utilisé le FRAM pour démontrer de quelle manière cette méthode peut être utilisée pour identifier les sources de variabilité existant dans un programme universitaire pouvant mener à des délais de graduation (Hussein et al., 2018b). Patriarca et al. présentent une étude où le FRAM est utilisé dans un contexte de gestion du risque environnemental (Patriarca et al., 2017). Pereira (2013) a utilisé le FRAM pour évaluer l'efficacité d'un processus de répartition dans le secteur de la radiopharmacologie.

Les résultats des différentes recherches sur le FRAM démontrent la propriété émergente des accidents lorsque plusieurs facteurs tels que des facteurs humains, technologiques et organisationnels interagissent à l'intérieur d'un système socio-technique plutôt que d'être le résultat d'un seul facteur (Tian et al., 2016). Ces résultats indiquent que les listes des causes d'accident résultant des approches d'ingénierie traditionnelles telles que l'analyse de l'arbre des causes (Fault Tree analysis), analyse des arbres d'évènements (Event Tree Analysis) et l'analyse des modes de défaillances, de leurs effets et leur criticité (Failure Modes Effects and Criticality Analysis) sont de plus en plus limitées pour expliquer les causes multiples qui mènent à un accident (Tian et al., 2016), mais surtout dans la compréhension du processus accidentel. Les méthodes conventionnelles se concentrent sur la description nominale du système, c'est-à-dire comment le système a été conçu. Les analyses de causes fondamentales identifient les causes de défaillance dans le système nominal. Bien souvent, des causes telles que l'erreur humaine sont alors mises en lumière dans les rapports d'enquête sur un accident.

Des études antérieures ont comparé le FRAM avec d'autres méthodes systémiques pour en évaluer les avantages et les désavantages. Herrera & Woltjer (2010) le comparent avec le Sequentially Timed Events Plotting method (STEP), Alvarenga et al., (2014) passent en revue plusieurs méthodes utilisées en Human Reliability Analysis (HRA) en incluant le FRAM. Dans son étude portant sur la supervision du trafic ferroviaire, Belmonte et al. (2011) compare le FRAM avec la méthode Fault Tree Analysis (FTA) dans la vitesse de détection d'un incident

chez les opérateurs de train. Dans ses conclusions, l'auteur mentionne les lacunes d'avoir uniquement recours à des modèles d'accident séquentiels pour comprendre un accident. Utilisé comme méthode complémentaire, le FRAM explore l'impact des facteurs humains et organisationnels plus profondément qu'une distribution probabiliste, comme le font la plupart des méthodes traditionnelles. La combinaison des méthodes classiques avec le FRAM dans une approche systémique est une étape vers une meilleure compréhension des activités réelles des travailleurs en prenant en considération les facteurs psychologiques et ergonomiques (Belmonte et al., 2011).

L'utilisation du FRAM comme méthode systémique d'analyse des risques comporte plusieurs avantages, tels que mentionnés dans les résultats des différentes études. Tout d'abord, en comparaison aux modèles classiques, le FRAM peut prendre en considération des aspects autant techniques que des aspects humains et organisationnels dans un seul modèle, permettant une réelle coopération multidisciplinaire. De plus, utilisé comme méthode complémentaire aux méthodes classiques, le FRAM fournit plus de détails sur les événements humains et organisationnels, permettant le raffinement des résultats qualitatifs. Une autre contribution du FRAM est qu'il met en lumière des interactions complexes qui émergent du système socio-technique en identifiant divers scénarios possibles. Un autre avantage est que le FRAM permet aux chercheurs de considérer plusieurs hypothèses concernant les conditions de performance des opérateurs et comment cela peut avoir un impact sur la sécurité du système. De plus, il peut synthétiser les résultats en scénarios pour l'utilisation d'une méthode classique. Finalement, le FRAM peut permettre d'identifier des facteurs de risques supplémentaires et mettre en lumière les sources de la variabilité et de la fragilité d'un système (Belmonte et al., 2011).

Malgré le fait que le FRAM soit une méthode prometteuse en matière d'analyse des risques et de compréhension des accidents du travail, certains auteurs identifient plusieurs limites de cette méthode (Tian et al., 2016) :

- Le FRAM est centralisé sur la description rigoureuse des fonctions du système ainsi que sur la caractérisation des aspects des fonctions, mais la compréhension des mécanismes de

- résonance fonctionnelle qui sous-tend la variabilité de la performance des fonctions est très dépendante de la subjectivité d'interprétation des analystes;
- L'absence d'un modèle de support général rend le FRAM difficile à s'adapter à différents types d'analyses de cas;
 - Le FRAM n'a pas gagné l'acceptation à l'extérieur du secteur académique tel que les praticiens puisqu'il est encore considéré comme étant un concept théorique plutôt qu'une approche pratique;
 - Lorsque le FRAM est utilisé, une analyse supplémentaire doit être faite pour décrire comment le système fonctionne. Cela implique d'aller au-delà de la cueillette et de l'analyse des données en lien avec l'accident lui-même et nécessite une connaissance approfondie du système à être défini.

1.3 Objectif de recherche

Cette recherche vise principalement à fournir aux entreprises manufacturières une méthode d'analyse des risques qui tient compte des risques émergents auxquels elles font face. Ces risques sont à l'origine du déraillement possible de la sécurité d'un système. À cet effet, l'objectif de cette recherche est d'analyser si l'utilisation du FRAM comme méthode d'analyse des risques, dans un processus global d'appréciation du risque, permet de prendre en compte les risques émergents auxquels font face les entreprises du secteur manufacturier. Afin de répondre à notre objectif de recherche, deux sous-objectifs sont définis :

- 1) Déterminer si le FRAM est une méthode pouvant être transposée au secteur manufacturier.
En effet, le FRAM n'a jamais été utilisé dans ce type de secteur pour une application en SST;
- 2) Comparer les résultats obtenus par une méthode traditionnelle d'analyse de risques (AMDEC) avec les résultats obtenus par le FRAM.

En tenant compte de la revue de la littérature décrite dans ce chapitre, une hypothèse de recherche est formulée selon laquelle les entreprises manufacturières auraient avantage à utiliser des méthodes complémentaires aux méthodes traditionnelles afin de considérer

l'impact des risques émergents de niveaux organisationnel et humain sur la sécurité de leur système. Les méthodes traditionnelles étant relativement limitées en ce domaine.

CHAPITRE 2

MÉTHODOLOGIE

Ce chapitre présente la méthodologie suivie pour atteindre l'objectif de ce projet de recherche. Dans un premier temps, nous présentons la démarche méthodologique (2.1) qui a été suivie. Dans un deuxième temps, nous présentons la méthode de collecte des données (2.2). Finalement, la section 2.3 présente la façon dont les données seront traitées.

2.1 L'étude de cas comme méthode de recherche

Le choix de la méthode de recherche est une étape importante dans notre processus de recherche. La méthode choisie pour cette recherche est une étude de cas puisque c'est cette méthode qui répondait le mieux aux objectifs visés par cette recherche. Selon Gagnon (2012), l'étude de cas permet une compréhension approfondie des phénomènes, des processus les composant et des personnes y prenant part. Comme la mise en application d'une méthode d'analyse de risque comme le FRAM exige une vision systémique et une forte compréhension des différentes interactions à l'intérieur du système, l'étude de cas comme méthode de recherche est tout à fait pertinente.

Gagnon (2012) reprend les quatre questions fondamentales proposées par Benbasat (Gagnon, 2012) afin d'établir la pertinence d'avoir recours à l'étude de cas comme méthode de recherche. Une réponse affirmative à chacune des questions démontre la compatibilité de la problématique de recherche avec l'étude de cas.

- 1) Le phénomène qui est l'objet d'intérêt doit-il être étudié dans son contexte naturel pour être vraiment compris?
- 2) Faut-il mettre l'accent sur les événements contemporains dans l'étude de cette problématique?

- 3) La connaissance du phénomène peut-elle être acquise sans avoir à contrôler ou à manipuler les sujets ou les évènements en cause?
- 4) La base théorique qui existe au sujet de la problématique sous étude comporte-t-elle des éléments non expliqués?

Dans le cas spécifique de ce projet de recherche, nous avons utilisé le cas unique d'une entreprise manufacturière. Cette étude de cas s'est effectuée en suivant les étapes de réalisation d'une étude de cas définies dans la littérature et suit un processus complet. Ce processus étant composé de différentes étapes, la figure 2.1, ci-dessous, illustre graphiquement ces étapes, soit : (1) identification de la problématique de la recherche; (2) définition des objectifs et sous-objectifs de la recherche; (3) détermination de la méthodologie de la recherche; (4) collecte des données; (5) traitement des données; (6) analyse des données recueillies; (7) interprétation des résultats obtenus et, finalement, (8) conclusion et recommandation.

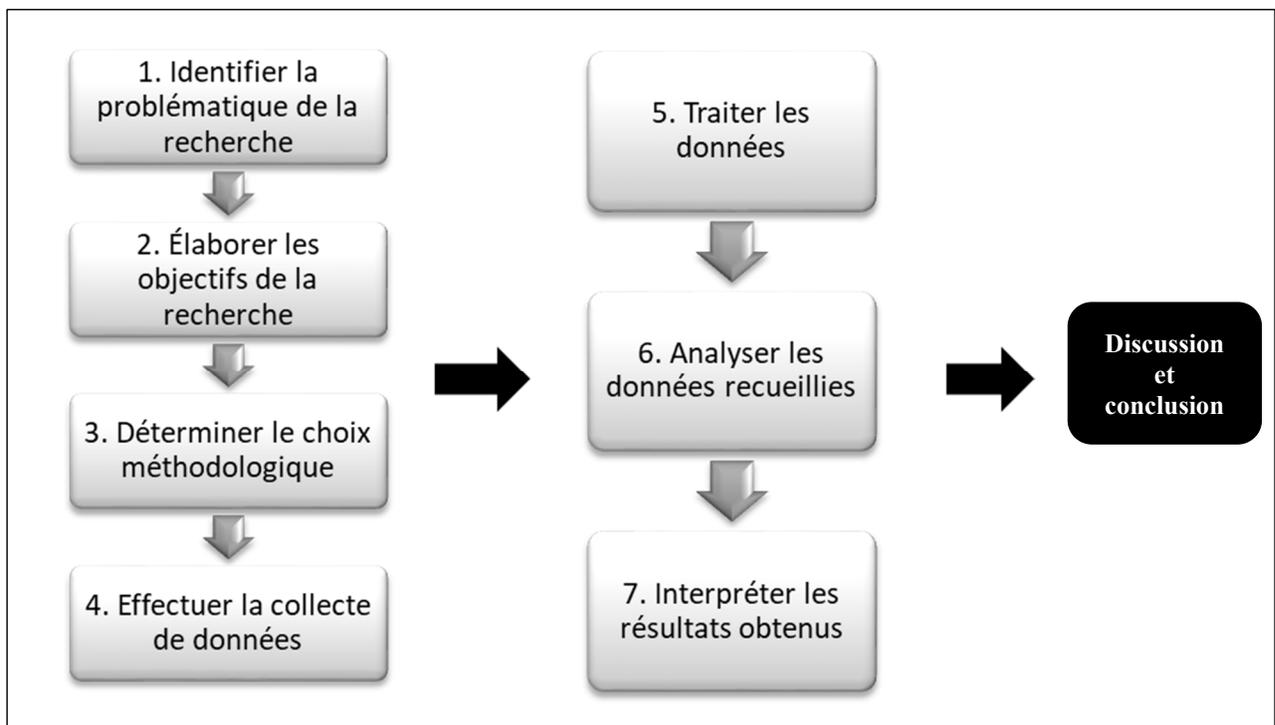


Figure 2.1 Démarche méthodologique

2.2 Collecte des données

Afin de définir la méthode de cueillette des données la plus appropriée, il a été nécessaire de présenter le projet de recherche à la direction de l'entreprise. L'entreprise est composée de plusieurs secteurs et départements qui comportent chacun leur particularité. La présentation des objectifs de recherche à la direction a permis ainsi de faire un choix judicieux sur le secteur à étudier. Il n'a pas été nécessaire d'obtenir un certificat d'éthique pour la cueillette des données relatives à cette recherche. Au moment de la cueillette de données, l'ÉPTC en vigueur était celui de 2014. Dans cette optique, puisque les données recueillies ne permettaient pas d'identifier les sujets et qu'il s'agissait de données relatives au fonctionnement de l'organisation, un certificat d'éthique n'a pas été jugé nécessaire selon nos échanges avec le CÉR de l'ÉTS au moment de la préparation de la phase de notre projet de recherche (voir Annexe II).

Plusieurs méthodes de cueillette des données ont été utilisées. Tout d'abord, nous avons effectué une analyse documentaire de l'entreprise pour comprendre le contexte et le fonctionnement global de l'entreprise. Finalement, une cueillette de données sur le terrain a été nécessaire. Cette cueillette s'est faite à l'aide d'entrevues semi-dirigées et d'observations sur le terrain. La figure ci-dessous représente le processus de cueillette des données qui a été suivi.

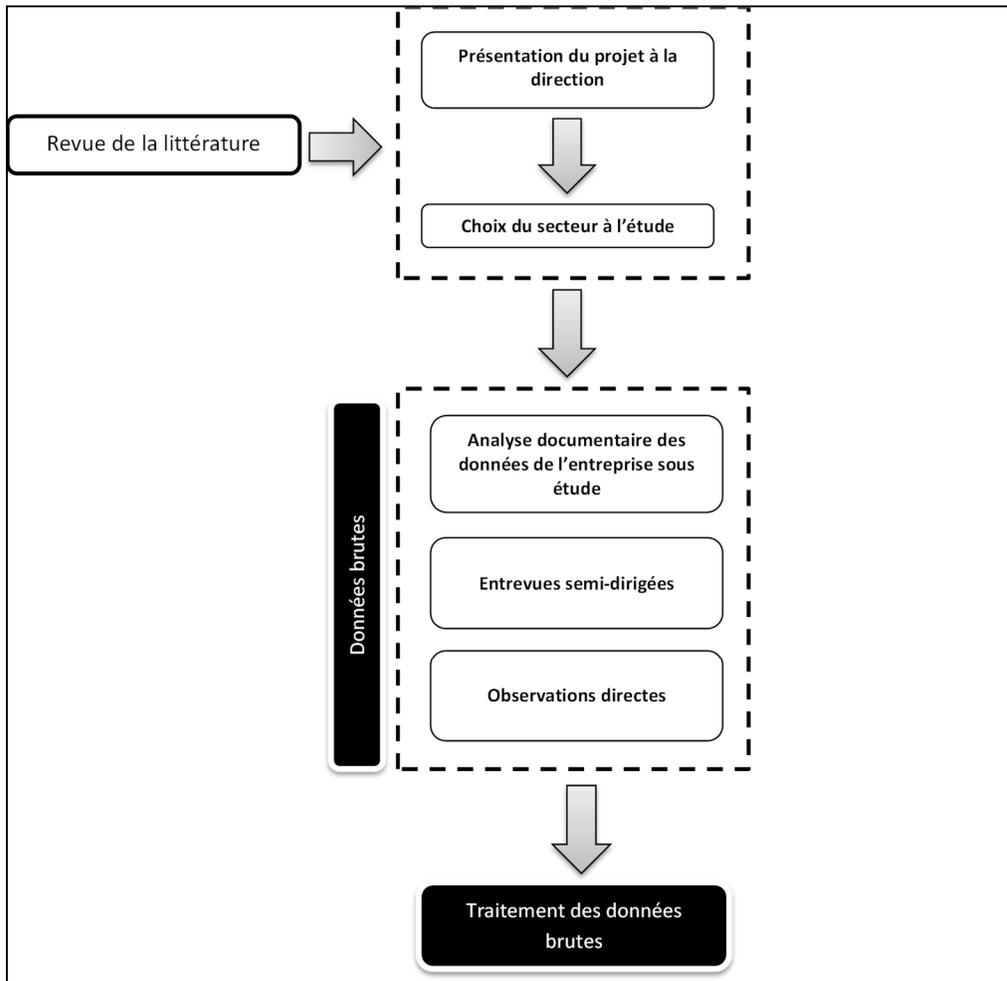


Figure 2.2 Processus de cueillette des données

2.2.1 Analyse documentaire de l'entreprise

La première étape dans notre processus de cueillette de données a été d'effectuer une analyse documentaire de l'entreprise. Cette analyse nous a fourni de l'information essentielle pour comprendre le contexte de l'entreprise et être en mesure de dresser un portrait général de sa situation, entre autres ses politiques de gestion, ses procédés de production, mais principalement sa structure de gestion de la SST et, donc, sa structure de gestion des risques. Il a alors été possible de nous familiariser avec les méthodes utilisées à l'interne pour la gestion

et l'identification des risques et ainsi de pouvoir comparer notre méthode avec celle en place dans l'entreprise.

2.2.2 Entrevues semi-dirigées

Les entrevues semi-dirigées auprès des gestionnaires et des travailleurs ont servi à recueillir l'information nécessaire pour développer le modèle FRAM du secteur choisi. Comme le FRAM est basé sur la modélisation du fonctionnement normal du système, il a été essentiel d'obtenir ces informations par le biais d'entrevues semi-dirigées auprès des travailleurs. Les entrevues semi-dirigées ont porté sur les deux premières étapes du développement du modèle FRAM tel que défini dans la littérature (Hollnagel, 2012) :

- 1) Identification et description des fonctions importantes du système ainsi que la caractérisation de chacune de ces fonctions en utilisant les six aspects;
- 2) Caractérisation de la variabilité potentielle des fonctions du modèle FRAM ainsi que la possible variabilité actuelle.

Les entrevues ont été réalisées auprès de travailleurs et gestionnaires. Les entrevues n'ont pas été enregistrées, filmées ou photographiées. Les données ont été recueillies à l'aide d'un questionnaire sur lequel les notes ont été consignées. Le questionnaire est présenté à l'Annexe I.

2.2.3 Observations directes

Les observations directes sur le terrain ont permis de se familiariser avec le procédé de fabrication pour être en mesure de mieux comprendre comment s'effectue le travail et dans quel environnement. Elles ont permis également de compléter les entrevues semi-dirigées et de compléter les grilles d'entrevues. Ces observations n'ont pas été enregistrées, filmées ou photographiées.

2.3 Traitement des données

Les données recueillies pour le développement du FRAM ont été traitées avec le logiciel *FRAMVisualizer*. Ce logiciel est gratuit et disponible sur le site de la communauté FRAMily (www.functionalresonance.com). Une fois les données insérées dans le logiciel, il est possible d'effectuer différents scénarios pour comprendre comment la variabilité de la performance aura un impact sur le reste du système et ainsi compléter la troisième étape du FRAM.

CHAPITRE 3

RESILIENCE ENGINEERING FOR SUSTAINABLE PREVENTION IN THE MANUFACTURING SECTOR: A COMPARATIVE STUDY OF TWO METHODS OF RISK ANALYSIS

Annick Melanson ^a, Sylvie Nadeau ^b

^{a, b} Département de génie mécanique, École de technologie supérieure,
1100 rue Notre-Dame West, Montreal, Canada, H3C 1K3

Article soumis pour publication dans «Reliability Engineering and System Safety»,
juin 2018

Abstract

Manufacturing businesses today have become complex sociotechnical systems. They must manage a variety of risks, including those related to occupational health and safety and emergent ones. In this article, we examine the possibility of using resilience engineering to provide a framework for the management of OHS and emergent risks in manufacturing businesses. More specifically, we compare failure mode effect and criticality analysis (FMECA) to functional resonance analysis method (FRAM), the former being an established risk analysis method in the manufacturing sector and the latter being a relatively novel method used primarily in high-risk sectors such as air travel, hospitals and railways. These two methods differ in several respects, but comparison reveals their relative advantages as well as their complementarity. Our principal finding confirms the advantages of the functional resonance analysis method in risk management for complex systems. Although failure mode effect and criticality analysis is more effective for understanding technical risks, functional resonance analysis method provides better understanding of the system as a whole and allows more efficient management of organisational risks as well as risks associated with the variability of human performance.

Keywords

Resilience engineering

Functional resonance analysis method

Risk assessment

Manufacturing environment

3.1 Introduction

Proper management of risks is an important part of ensuring the competitiveness of manufacturing businesses. The rapid pace of the changes taking place in this economic sector is increasing the complexity of the business environment and creating all kinds of emergent risks that must be taken into account. The digital-organized production related to new technologies is also a challenge mainly because it changes the working environment (23). To manage risks adequately, a business must be able to analyse and assess them. Risk analysis is a systematic process of identifying occurrences that could affect an organisation's chances of attaining its goals (34). This process is indispensable for all managerial functions of a business, including occupational health and safety (OHS).

Over the past few decades, several methods of risk analysis have been developed for use in manufacturing settings. All have the same aim, namely eliminating accidents in the workplace. They have evolved and have contributed substantially to advancing knowledge in the field of OHS. However, despite much effort, the goal of achieving substantial reductions in the frequency of workplace accidents remains elusive (29). It is being observed more and more that the risk analysis methods and accident models in current use are not in tune with current knowledge in the field of OHS management (7). To improve workplace safety, other types of factors need to be taken into consideration. The evolution of accident models reflects this, as emphasis has shifted from technical factors to the human factors (24). In addition, organisational factors need to be considered as emergent risks within businesses nowadays (15).

Most of the conventional methods of risk analysis used in the manufacturing sector take technical elements and the human factors into account. However, the complexity of manufacturing businesses is increasing, and there is a growing need for a method that also takes new realities into account. Conventional methods are not necessarily up to the task of identifying and analysing risks in complex sociotechnical systems (7, 29). Most of the time,

these methods are sufficient when dealing with simple risks but seem to be less effective when dealing with organisational or systemic risks. According to current thought, analysis must take into account potentially emergent risks inherent in the organisation itself (15) or in its supervision and management or in governmental legislation and policy (7).

Several paths to improved understanding of the challenges associated with risk analysis in complex systems have been proposed in the literature (5). In recent years, new models of systemic risk analysis have been developed to consider the sociotechnical system as a whole. Among these, the system-theoretic accident model and processes or STAMP method (17), the functional resonance analysis method or FRAM (12) and the risk management framework model (26) have been the subject of numerous articles. Although these models differ in several ways, they share a common vision that considers safety to be influenced by all levels of the system. In other words, it is acknowledged that production workers are at the very end of the chain and have very little impact on actions or processes upstream (7).

This situation raises questions regarding the risk analysis and management methods used in manufacturing settings, in particular whether or not conventional methods alone are adequate for analysing the emergent risks that manufacturing businesses are now facing. In such companies, the dangers inherent in these risks might be going unnoticed (36). It appears that it would be dangerous to rely on these methods alone or to assume that they still effectively take into account the current complexity of businesses (29).

In this article, we compare one conventional and one relatively novel method of risk analysis and assess the complementarity of the two. We consider resilience engineering as a new paradigm for defining a framework for risk management. We begin by examining how failure mode effect and criticality analysis (FMECA) is applied as a conventional risk analysis method to a specific facet of a manufacturing business. We then examine the application of the systemic method known as FRAM, which is representative of resilience engineering. In the final section, we discuss the relevance of systemic methods to risk management in the

manufacturing sector as well as how the complexity of business nowadays is requiring managers to use a variety of methods to analyse risks effectively.

3.2 Resilience engineering as a model of risk management

In recent years, the scientific community has been examining the implications of a new paradigm in OHS management, namely resilience engineering. From a sociotechnical system perspective, resilience means the ability of a system or organisation to respond to and recover from a disruptive event while minimizing its loss of dynamic stability (28). Resilience needs robustness and flexibility when facing predictable changes and agility to cope with uncertainties (16).

Resilience engineering is based on several fundamentals (10). To begin with, OHS management is reactive and proactive, meaning that it takes past events into account but also attempts to identify and even anticipate OHS risks. Next, it is understood that a given event or condition may lead to an accident or not, depending on performance within the system. OHS management is an integral part of the fundamental preoccupations of an organisation, just like the activities that underlie production and profitability. Safety is a prerequisite for productivity and profitability and vice-versa. Safety is therefore viewed as a continuous improvement factor and not as a constraint on productivity (27).

By focusing on the various modes of possible system failure, the resilience engineering approach to OHS management differs considerably from that of conventional approaches based on sequential or epidemiological accident models that aim to avoid accidents by making processes capable of confining all performance variability. This approach is called Safety I (13). In contrast, resilience engineering or Safety II recognizes the inevitability of performance variability within the system and attempts to take advantage of it, considering it necessary for greater flexibility and better adaptation to the various disruptions to which a business may be subjected. A comparison of Safety I and Safety II reveals their complementarity (13). Resilience engineering provides support to conventional methods for better management of

human and organisational factors while conventional safety management focus on accident causation. From this perspective, both are essential.

If resilience engineering is to fill certain gaps in risk management, the risk analysis method should satisfy the following requirements (20):

- 1) It must be systemic. Analysis of OHS risks cannot be confined to a single element of the sociotechnical system. The method must consider the organisation as a whole rather than treat it as an assembly of several components.
- 2) It must model the normal functioning of the sociotechnical system. Most models focus on the possibility of system failure or of an accident. From a resilience engineering perspective, normal functioning of the system may be the source of success or of failure.
- 3) It must view accidents and safety as an emergent phenomenon resulting from the normal functioning of the sociotechnical system.
- 4) It must be able to take human performance into account not in nominal or standardised terms, but in a way that describes performance variability as a manifestation of constant adjustment made by workers as they perform their daily tasks. For this purpose, the positive contribution of workers to the safety of the organisation must be known.

In the section that follows, a new method of risk analysis based on the principles of resilience engineering and satisfying the four criteria listed above is presented.

3.3 The functional resonance analysis method (FRAM)

Functional resonance analysis is a method of analysing risk in complex sociotechnical systems (12). It uses the principle of resonance to reveal how the variability of one function can affect functions downstream. The daily functions necessary for adequate performance of the system are identified, the performance variability at each of the functions is characterised, the potential variability is defined and interpreted, and finally ways of monitoring and reducing this variability are proposed. The particularity of FRAM is that it is based on the work as it is

actually carried out on a daily basis (work-as-done) and not on written procedures or established production sequences (work-as-imagined).

Developing a FRAM model required to follow 4 main steps (12):

1. Identify and describe functions.
2. Characterise the variability of the functions.
3. Aggregate the variability.
4. Propose means of managing the variability.

FRAM is thus based on four principles (10):

Principle of equivalence: A hypothesis according to which different types of consequences do not necessarily have independent causes but rather may arise from one set of related causes or even the same cause.

Principle of approximate adjustment: A hypothesis according to which individuals adjust their actions continually to match them with the conditions under which they are carried out.

Principle of emergence: Recognition that not all results can be explained in terms of a single identifiable and specific cause.

Principle of resonance: In situations where it is neither possible nor reasonable to use a cause-effect relationship to explain an event, functional resonance is used to explain non-linear relationships and results attributable to them. The principle of functional resonance was borrowed from the principle of stochastic resonance in physics to demonstrate the non-linear effect of the variability of one function on another function.

Since its development, FRAM has been applied in a variety of ways in various sectors, for example in air-traffic control in Europe (6, 14, 20) and in the pharmaceutical sector (25). It is also gaining ground in the European hospitals, particularly in southern Denmark, where its use began several years ago (13).

Various studies of the use of FRAM demonstrate the emergent property of accidents when a plurality of factors such as human behaviour, technology and organisational characteristics interact within a system (36). The very existence of this interaction shows that accidents cannot be the result of a single factor (32). Conventional approaches such as *fault tree analysis (FTA)*, *event tree analysis (ETA)* and *failure mode, effects and criticality analysis (FMECA)* are less and less helpful not only for explaining the composite causes that lead to an accident (32) but also for understanding how an accident develops.

The advantages and disadvantages of FRAM have been examined in earlier comparisons with other systemic methods. One of these is the sequentially timed events plotting or STEP method, which was found inadequate for the identification of certain causes of accidents (9). FRAM appears to be better suited for the analysis and understanding of dynamic and non-linear systems such as sociotechnical systems.

Methods used in human reliability analysis (HRA), including FRAM, have been reviewed in recent years (2). Since then, FRAM has been used as a method of qualitative analysis in support of quantitative risk analysis. Especially in a study of human reliability that showed the importance of factoring qualitative information into risk analysis, when calculating human error or reliability (34).

In the field of railway traffic supervision, FRAM has been compared to FTA in a study of the speed with which train operators detect potential incidents (4). In his conclusion, the author emphasized the pitfalls of relying on sequential models alone for the analysis of accidents.

Most of these studies show that the use of FRAM as a complementary method in risk analysis provides insight into the impact of human and organisational factors. The combination of one or more conventional methods with FRAM in a systemic approach is therefore a step towards better understanding of what workers are actually doing on the job (4).

The methodology used in the present study is described in the section below.

3.4 Methodology

The research methodology used is a case study (8) carried out on the premises of a manufacturing activity. The two methods selected are failure mode effect and criticality analysis (FMECA, used widely in risk management in this sector) and FRAM, a systemic method representing application of the principles of resilience engineering as just described in section 3.

The organization that participated in the study has been well established for many years in North America and has over a thousand employees. It is thus a large company, typical of motor vehicle manufacturing. Among the numerous activities of the participant, the corporate managers chose chassis assembly because it represents a critical step in the manufacturing chain. This operation is subject to much variability mainly because it is carried out manually and involves welders who must use a variety of welding methods and processes. When the welds are completed, the chassis is sent to an assembly line where the remaining parts are installed. The studied setting comprised 26 different workstations to which up to 95 welders may be assigned, depending on demand.

The study was carried out in two stages. We began by gathering the data contained in the company's FMECAs. We then developed the FRAM model for this sector of activity.

3.4.1 Failure mode effect and criticality analysis (FMECA)

FMECA is a method of risk analysis developed in the USA during the 1960s. Towards the end of the 1970s, it was brought into the automobile industry, notably at Toyota, Nissan, Ford, BMW, Peugeot, Volvo and Chrysler. It subsequently became a practiced and proven method in several other industries around the world. It is described as an inductive method for carrying out qualitative and quantitative analyses of system reliability and safety (1). The method

comprises examining the causes and consequences of each of the potential failures of a system. It ranks potential failures in terms of the estimated level of risk associated with each (criticality).

There are several types of FMECA analysis such as processes, system or design (37). This method is also used in the field of Occupational Health and Safety. The safety FMECA is a method for the identification of hazards and the analysis of the risk to which the worker might be exposed. Thus, evaluation criteria are based on the probability that a hazardous situation could arise, the frequency and time of exposure of the operator, and finally the severity of potential injuries if the risk occurred. The Safety FMECA might assist designers to perform a risk assessment at the beginning of the design process (19). The risk priority number (RPN) is obtained by the multiplication of the severity of the injury if the failure mode occurred, the probability of the occurrence that the failure mode occur as a result of a specific cause and the frequency of exposure to the hazard.

We chose FMECA for this case study because it is used widely for OHS risk analysis in manufacturing settings and the participating company had been using it for this purpose for several years. For the first phase of this study, the company kindly provided us with the results of the analyses conducted by in-house analysts during the period of 2013–2015. Although these analyses were carried out for each of the departments and workstations in the production facility, only the data concerning the operation under study were provided. These represent about a hundred risks all entered into a grid in spreadsheet format.

3.4.2 Functional resonance analysis method (FRAM)

The FRAM model for chassis assembly had been developed previously in the course of our study on the applicability of FRAM to the manufacturing sector (22). The relevant information used came from field observations as well as semi-directed interviews conducted with 11 individuals (workers, professionals and managers) who work in this sector. Thorough understanding of the system as a whole is necessary for the development of such a model. For

this reason, a variety of individuals were interviewed. Those interviews were focussed on production activities to analyse and understand the organisational environment. The results obtained using the model are presented in the section that follows.

3.5 Results

The department of worker health and safety in the participating company began in 2013 to use FMECA to document risks present within the facility and its operations. The results thus obtained were used to identify the various risks within the operation under study. The risks were compiled first according to department and then according to the tasks performed by welders. A list of risks was thus identified for each task, for example:

- Risk of falling from heights;
- Risks associated with welding (burns, inhaling of welding smoke, particles in eyes, etc.);
- Risk of fingers, skin and so on getting caught between sections of chassis;
- Risks associated with ergonomic factors (constrained postures, moving heavy loads, confined work space).

To rank the risks thus identified, Safety FMECA uses a quantitative method of evaluation based on three criteria: Severity, Occurrence and Frequency. Each of the criteria is defined on a ranking scale. This ranking of risks helps managers define priorities to implement risk elimination or control measures. For example, an index greater than 250 indicates a critical risk. The possible failure modes for each enumerated risk are then listed. For example, the different circumstances that could lead to a worker falling: an improper manoeuvre, working at heights without a proper anti-fall device, tripping on objects on the ground, and so on. The failure modes may be numerous. The risk elimination or control measures might include a program to ensure the use of anti-fall devices, for example wearing a safety harness.

The development of the FRAM model required identification of the principal functions necessary for the desired functioning of the system (22). Each of these functions is then

described in terms of the six aspects of FRAM (input, output, resources, preconditions, time, and control). The table below describes one of the system functions, namely *planning the production sequence*.

Table 1 – Description of the function *planning the production sequence*

Name of function	Planning the production sequence
Description of the function	Preparing the production schedule for each of the workstations of the department
Aspects	Description of the aspect
Inputs	<ul style="list-style-type: none"> - Ordering of production - Vehicle number - Workstations, including the sub-assemblies and the line - Stocking the workstations with the necessary materials - Manufacturing date (AM/PM, evening 1 / evening 2) - Specifications of vehicles to be produced (In SAP)
Outputs	Production master plan
Precondition	Not defined
Resource	<ul style="list-style-type: none"> - Experience and training - Computer tools (software)

Control	Manual revision of the production schedule to detect errors
Time	Not defined

Since FRAM allows analysis of different scenarios to understand how the system functions and to define its range of variation, various potential scenarios may be analysed to understand the impact that variable inputs to a function would have downstream.

The scenario presented here is that of a wrong part being taken and inserted in the wrong position in the sub-assembly. In this situation, the worker does not realise that he/she has not used the right part since the parts are not all identified on the parts trolley. He/she completes his/her assembly, which is then moved to the next workstation. The table below illustrates how variable performance by the worker will have an impact on the system.

Table 2 – Potential variability of the function *assembly of the roof structure*

Upstream function	Output from upstream function	Downstream function	Time	Precision	Effects on the function downstream
Assembly of the roof structure	Roof structure does not meet specifications	Finishing assembly of the chassis	On time	Imprecise	Increase variability

In the above case, the function *assembly of the roof structure* receives an incorrect input, one that does not meet assembly requirements, meaning that the quality of the input per se is inadequate. This non-compliance might not be detected at the subsequent workstation (i.e. the function *finishing assembly of the chassis*), since there is no formal monitoring mechanism in place. Not being able to detect this variability could have the following consequences:

- Increased pressure on workers because of the time required to correct the error. This company operates with TAKT time, which reduces workers' margin for manoeuvre;
- Decreased productivity due to the reworking that will be necessary to correct the error;
- Increased risks associated with the use of tools such as grinders (to cut and remove the part) and welders to redo the work;
- Increased costs associated with time and parts;
- Decreased product quality.

The consequences for the rest of the system can be multiple, as much for OHS as for productivity and quality. In this case, rapid detection of the error will allow a reduction of its negative impact on the assembly process, in other words, the effects of performance variability will be buffered. Such variability will be greater where new employees are involved. Based on the results of different scenarios, the business will be able to devise and implement means of reducing the impact of performance variability.

3.6 Discussion

Although the results of this case study demonstrate the applicability of FRAM in the manufacturing sector, the participation of only one business constitutes a major limitation on their interpretation. Our findings cannot be generalised to the manufacturing sector as a whole. In addition, the study was focused on a single operation within the company. It needs to be extended to the whole organisation to gain greater insight not only into the activity examined but also the interactions between the various operations within the company.

The FMECA method is relatively easy to understand and apply. It provides a chronological overview of the tasks carried out by the workers. However, it has the considerable shortcoming of not being designed to take human and organisational factors into account. The very basis of this method is the detection of the possible failure modes of a system without understanding their source. It nevertheless offers the possibility of ranking the risks as a function of specific criteria defined by the business and allowing managers to prioritise their actions.

The results reveal certain advantages of one method over the other. Each method identifies risks that the other overlooks. As an example, installing a wrong part when assembling the chassis will no doubt affect product quality, but will also increase OHS risks considerably. The workers will have to correct the error using procedures that may be improvised. The risks increase if the error is not detected quickly, that is, if assembly does not include organised monitoring, and corrective actions have to be carried out on the assembly line. In addition, in the present case, the time constraint is identified in the FRAM analysis but not in the FMECA analysis. The variability of the output of a function due to time could have major repercussions on the rest of the production line. Time constraints come from an organizational decision based on various factors specific to the organization. In the design of the system, the tasks were defined in a given order taking into account the nominal time required to perform each of these tasks. By modeling the actual operation of the system with FRAM, it is more obvious to highlight the trade-offs that workers make to achieve the goals. These compromises may be due to either time constraints or a lack of resources and information (11). In these situations, employees will have to adjust the way they do things within these constraints so that organizational goals are met

These elements cannot be identified using FMECA alone. On the other hand, FRAM is ineffective for detecting risks of a more technical nature, such as those associated with machine operation. The analysis of the various scenarios thus allows detection of elements that contribute to OHS, quality, productivity and processes weaknesses. This is why FRAM is recognised as a systemic method that takes human and organisational factors into account.

The two methods used for this study come from different approaches. While FMECA comes from system safety approach, FRAM is derived from the human factors approach. The logic behind each of the methods is different and does not constitute an alternative choice but rather a complementary choice. FMECA is a proven method for technical risk assessment, but is limited in organizational risk assessment and consideration of the actual functioning of the

system. System failures can emerge from a technical failure or spread of variability throughout the system (31).

This study thus corroborates the findings of several other studies. It recognises that FRAM offers advantages over other methods of risk analysis in terms of identifying factors that are not taken into account when using more conventional methods (9, 7, 4). The usefulness of FRAM has been demonstrated in several fields, including the hospital sector, the petrochemical industry and the aeronautical industry. This study also corroborates several studies on FMECA and the need to address the limits of this method (18, 30, 33, 35).

The main contribution of the present study is to confirm that FRAM can add value to risk management in the manufacturing environment, which has not yet been the subject of case studies in this sense. Although it has been demonstrated previously that FRAM could be of use in the manufacturing sector (22), it appears also to offer an advantage over conventional methods in some instances, by considering contextual and operational factors that affect work as it is carried out on a daily basis. Including these organisational factors in risk management is a key element for improving OHS performance since they play a causative role in the occurrence of accidents (16). In addition, the study was conducted in a manufacturing company adopting a philosophy of LEAN management. LEAN management is a management mode based on the elimination of wastes to reduce activities without added value for the customer. One of the objectives of LEAN management is to reduce any source of internal or external variability by standardizing processes. Although at first sight the notion of LEAN and resilience seem contradictory, studies have demonstrated their synergistic character (21). Our study makes an additional contribution in this direction by addressing OHS risks for employees. By integrating a method such as FRAM into risk assessment and analysis, the company will be able to make the most of this synergy to improve its performance in a sustainable way. Indeed, the FRAM makes it possible to better take into consideration the leeway of the employees and the need for variability in their performance for the maintenance and the safety of the system.

In the light of the above, it must be concluded that the applications of FRAM are not limited to OHS management. In this study, elements of productivity and quality were identified, suggesting that FRAM could be used to reveal weaknesses in process design. Variability in human performance also has a major impact on production quality and productivity. Better understanding of the normal functioning of the system can enable managers to identify zones of process fragility. In addition, FRAM allows the design of a wide variety of scenarios, current, potential or hypothetical, as well as the winning conditions. Therefore, it can be an effective tool for improving the robustness of anticipated processes as well as for improving the resilience of a business in the face of unforeseen developments.

3.7 Conclusion and future work

The objective of this study was to compare and to note the complementarity of two methods of risk analysis applied in a manufacturing setting. The comparison of FMECA and FRAM provided insight into the importance of considering organisational factors. Although the validity of many conventional methods of risk analysis has been proven in recent years, they do not by themselves reveal the emergent risks with which many manufacturing businesses are now confronted. These businesses need to consider novel and more systemic approaches that take into account the increasing complexity of their activities and social environment. Indeed, they need to view their operations as sociotechnical systems. The results of this study demonstrate that FRAM can be helpful for this purpose. Manufacturing businesses could use systemic methods as a complement to conventional methods to gain insight into the most determinant aspects of their production systems and into the implications of these in terms of OHS.

The use of FRAM in the manufacturing context warrants more in-depth study to obtain results that can be generalised. In addition, more studies could be conducted to integrate FRAM in lean management as a way to improve the resilience of the system.

Acknowledgments

The authors thank the Natural Sciences and Engineering Research Council (NSERC), École de technologie supérieure (ETS) and the Association Québécoise pour l'Hygiène, la Santé et la Sécurité (AQHSST) for financial support, and professor Bryan Boudreau-Trudel for his support and comments during the preparation of this article.

3.8 References

1. AFNOR 31010 :2010 Gestion des risques : Techniques d'évaluation des risques,
2. Alvarenga, M.A.B., Melo, P.F. Frutuoso, Fonseca, R.A. (2014). A critical review of analysis. *Progress in Nuclear Energy* 75, 25–41.
3. Baxter, P, Jack, S. (2008). Qualitative Case Study Methodology: Study design and Implementation for Novice Researchers. *The qualitative Report* 13 (4), 544-559.
4. Belmonte, F, Schon W, Heurley L and Capel R. (2011). « Interdisciplinary safety analysis of complex socio-technological systems based on the functional resonance accident model: An application to railway traffic supervision ». *Reliability Engineering and System Safety* 96 (2), 237-249.
5. Bjerga T, Aven T, Zio E. (2016). Uncertainty treatment in risk analysis of complex systems: The cases of STAMP and FRAM. *Reliability Engineering and System Safety* 156, 203–209.
6. Carvalho P. Rodrigues V. (2011). The use of Functional Resonance Analysis Method (FRAM) in a mid-air collision to understand some characteristics of the air traffic management system resilience. *Reliability Engineering and System Safety*, 96, 1482-1498.
7. Dallat, C., Salmon PM, Natassia G (in press). (2017). Risky systems versus risky people: To what extent do risk assessment methods consider the systems approach to accident causation? A review of the literature. *Safety Science*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ssci.2017.03.012>
8. Gagnon, Yves-Chantal, 2012. L'étude de cas comme méthode de recherche, 2^e édition. Québec: Presses de l'Université du Québec, 123p.
9. Herrera, I.A., and Woltjer R. (2010). Comparing a multi-linear (STEP) and systemic (FRAM) method for accident analysis. *Reliability Engineering and System Safety*, 95 (12), 1269-1275.
10. Hollnagel E, Woods D D, Leveson N. (2006). *Resilience engineering: concepts and precepts*. Aldershot: Ashgate Publishing Ltd. 397p.
11. Hollnagel, E. (2009). *The ETTO principle: Efficiency-Thoroughness Trade-Off*. London: CRC Press. 162p.
12. Hollnagel E. (2012). *FRAM: the functional resonance analysis method: modeling complex socio-technical systems*, 1ère ed. England: Ashgate Publishing Limited, 142p.
13. Hollnagel Erik. (2014). *Safety I and Safety II: The past and the future of safety management*, New edition ed. England: Ashgate Publishing Limited, 187p.
14. Hollnagel, E., Pruchnicki, S., Woltjer, R. (2008). Analysis of Comair flight 5191 Modeling of Control over Flight activity. In: *Euro control Annual Safety R&D*
15. Komljenovic D., Loiselle G., Kumral M. (2017). Organization: A new focus on mine safety improvement in a complex operational and business environment. *International Journal of Mining Science and Technology*, 27, 617-625 <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmst.2017.05.006>
16. Lescure, E., Nadeau, S., Morency, F. PME et SST : Quand la résilience est un modèle d'affaires. 50ième congrès de la SELF, 23 au 25 septembre 2015, Paris, France.
17. Leveson, N. (2004). A New Accident Model for Engineering Safer Systems. *Safety Science*, 42 (4), 237-270.

18. Liu H-C, Liu L, Liu N. (2013). Risk evaluation approach in failure mode and effects analysis: a literature review. *Expert Systems with Applications*, 40, 828–838.
19. Lux, A., Mawo, J., De Bikond, A., Quillerou-Grivot, E. (2016). FMEA and consideration of real work situations for safer design of production systems, *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, 22:4, 557-564, DOI: 10.1080/10803548.2016.1180856
20. Macchi, Luigi. (2010). Resilience engineering approach to the evaluation of performance variability: development and application of the Functional Resonance Analysis Method for Air Traffic Management safety assessment. Thèse de doctorat en sciences et génie des activités à risque, Paris, École Nationale Supérieure des Mines de Paris, 176p.
21. Maslaric, M., Backalic, T., Nikilicic, S., Mircetic, D. (2013). Assessing the trade-off between lean and resilience through supply chain risk management. *International Journal of Industrial Engineering and Management (IJIEM)*, Vol. 4 No 4, 2013, pp. 229-236.
22. Melanson, A., Nadeau, S. (2016) Managing OHS in Complex and Unpredictable Manufacturing Systems: Can FRAM Bring Agility? Proceedings of the 7th International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics (AHFE 2016) and the Affiliated Conference, July 27-31, Orlando, USA. In C. Schlick, S. Trzcielinski, *Advances in Ergonomics of Manufacturing: Managing the Enterprise of the Future*. Springer, 341-348.
23. Nadeau, S., Landau, K. Towards Dynamic and Adaptive Allocation of Staff in a Digital-organized Production Context: an Innovative Perspective from Work Science. In press (June) *Journal of Ergonomics*.
24. Patriarca R, Bergström J, Di Gravio G. (2017). Defining the functional resonance analysis space: Combining Abstraction Hierarchy and FRAM. *Reliability Engineering and System Safety*, 165, 34–46 <http://dx.doi.org/10.1016/j.ress.2017.03.032>
25. Pereira, Ana G.A.A. (2013). Introduction to the use of FRAM on the effectiveness assessment of a radiopharmaceutical dispatches process. In: *International Nuclear Atlantic Conference*. Brazil.
26. Rasmussen J. (1997). Risk management in a dynamic society: a modeling problem. *Safety Science* 27, 183–213.
27. Rigaud E. (2008). Le Management de la Sécurité ; Du management des risques au management de la résilience ; Forum Académique de l'AFIS 2008, Nîmes, décembre 2008.
28. Ruault J.R., Luzeaux D., Colas C. and Sarron J-C. (2011). Résilience des Systèmes Sociotechniques : application à l'ingénierie système. ResearchGate
29. Salmon, P.M., Walker, G.H., Stanton, N.A., Goode, N., Read, G., (2017). Fitting methods to paradigms: are ergonomics methods fit for systems thinking? *Journal Ergonomics*, 60 (2), 194–205. <http://dx.doi.org/10.1080/00140139.2015.1103385>.
30. Subburaman K. (2010). A modified FMEA approach to enhance reliability of lean systems [master's thesis]. Knoxville (TN), University of Tennessee.
31. Sujan M-A., Massimo, F. (2012). Combining Failure Mode and Functional Resonance Analyses in Healthcare Settings. *SAFECOMP 2012, LNCS 7612*, pp. 364–375.
32. Tian J. Wu J. Yang Q., Zhao T. (2016). FRAMA: A safety assessment approach based on Functional Resonance Analysis Method. *Safety Science*, 85, 41-52.

33. Rhee S-J, Ishii K. (2003). Using cost based FMEA to enhance reliability and serviceability. *Advanced Engineering Information*, 17, 179– 188.
34. Toroody, A.B, Abaiee, M.M., Gholamnia, R., Torody, M.B. and Nejad, N.H. (2016). Developing a Risk-Based Approach for Optimizing Human Reliability Assessment in an Offshore Operation. *Journal of Safety Science and Technology*, 6 (1), 25-34. <http://dx.doi.org/10.4236/ojsst.2016.61003>
35. Village J, Annett T, Lin E, et al. (2011) Adapting the failure modes effect analysis (FMEA) for early detection of human factors concerns. Proceedings of the 42nd annual conference of the Association of Canadian ergonomists, London (ON).
36. Yang Q, Tian J, Zhao T. (2017). Safety is an emergent property: Illustrating functional resonance in Air Traffic Management with formal verification. *Safety Science*, 93,162–177 <http://dx.doi.org/10.1016/j.ssci.2016.12.006>
37. Lipol, S. Haq, J. (2011). Risk analysis method: FMEA/FMECA in the organizations. *International Journal of Basic & Applied Sciences IJBAS-IJENS Vol: 11 No: 05*

CONCLUSION

Une gestion efficace et durable des risques de SST nécessite une bonne compréhension du système qu'est l'entreprise. Ainsi, la plupart des méthodes utilisées en SST pour l'analyse des risques sont statiques et limitées dans la considération des facteurs organisationnels et humains pour le maintien d'un système sécuritaire. Cela peut éventuellement mener à une mauvaise anticipation et compréhension du phénomène accidentel. Le fondement de ce projet de recherche était d'analyser comment l'intégration d'une méthode d'analyse systémique pouvait prendre en considération ces facteurs organisationnels et humains dans la compréhension du phénomène accidentel pour le secteur manufacturier, plus spécifiquement de fournir aux entreprises manufacturières une méthode pouvant enrichir leur processus global d'appréciation du risque en matière de SST. En ce sens, ce projet de recherche visait à vérifier l'hypothèse selon laquelle les entreprises manufacturières auraient avantage à utiliser des méthodes complémentaires aux méthodes traditionnelles afin de considérer l'impact des risques émergents de niveaux organisationnel et humain sur la sécurité de leur système.

Le principal objectif de ce projet de recherche était d'analyser si l'utilisation du FRAM comme méthode d'analyse de risque permet de mieux considérer les risques émergents auxquels font face les entreprises du secteur manufacturier. Pour répondre adéquatement à cet objectif, deux sous-objectifs ont été définis. Dans un premier temps, il a été nécessaire de valider si la méthodologie du FRAM pouvait être transposée dans le secteur manufacturier. En effet, cette méthode a été utilisée majoritairement dans des secteurs à haut niveau de risque (pétrochimie, nucléaire, hospitalier, etc.). Les résultats nous ont démontré que la méthode était efficace pour une utilisation dans le secteur manufacturier et qu'il était possible de modéliser un système manufacturier avec le FRAM. Finalement, une étude comparative entre le FRAM et l'AMDEC a été effectuée pour faire ressortir plusieurs éléments de complémentarité entre ces deux méthodes. Cette recherche a donc permis d'établir un lien fort entre les outils existants en

matière d'analyse de risque SST et la nécessité d'intégrer un outil d'analyse systémique tel que le FRAM dans le processus global d'appréciation du risque.

Bien que le FRAM ait d'abord été développé pour des problématiques liées à la SST, l'analyse des résultats a permis de corroborer avec d'autres étapes quant à la possibilité d'utiliser la méthode dans d'autres secteurs que la SST. En effet, le FRAM étant une méthode d'analyse systémique du risque, elle vise à mieux comprendre comment fonctionne un système pour anticiper d'éventuelles perturbations pouvant en affecter sa sécurité. Le FRAM permet d'améliorer la résilience organisationnelle, élément essentiel pour toutes les entreprises d'aujourd'hui.

ANNEXE I

GRILLE D'ENTREVUE SEMI-DIRIGÉE

Poste de travail :

1. INTRODUCTION

1.1 Pouvez-vous me faire une brève description de votre poste de travail? Quelles sont les étapes de réalisation?

1.2 Êtes-vous toujours attiré à ce poste ou s'il y a une rotation entre les divers postes de travail?

1.3 Selon vous, quelles sont les qualifications nécessaires pour effectuer ce travail?

1.4 Au meilleur de votre connaissance, est-ce que toutes les personnes qui effectuent ce travail ont les mêmes qualifications?

2. INPUT

2.1 À quelle partie de la structure êtes-vous attiré? Quelle est l'étape précédente, c'est-à-dire quelle section de la structure est avant votre étape?

2.2 Comment vous préparez-vous pour commencer votre travail? (documents, instructions de travail, collègues, etc.)?

2.3 Quelles sont les informations dont vous avez besoin pour débiter votre travail?

2.4 Quelles sont les formations particulières dont vous avez besoin pour effectuer votre travail?

3. PRECONDITION

3.1 Quelles sont les étapes de production qui doivent être réalisées avant que vous ne puissiez débiter votre tâche?

3.2 Quelles conditions doivent exister pour que vous puissiez réaliser votre activité? (Par exemple, telle pièce doit être faite avant telle autre, audit de qualité effectué, etc.) – Il peut en avoir plusieurs

3.3 De quelle information avez-vous besoin (équipement, service, etc.)

3.4 Que faites-vous si cela n'est pas disponible?

4. CONTRÔLE

4.1 Au meilleur de votre connaissance, existe-t-il des plans, procédures ou directives pour ce poste de travail? Si oui, à quel endroit pouvez-vous les consulter?

4.2 Est-ce que vous vous y référez?

5. RESSOURCES

5.1 Quelles sont les différentes ressources dont vous avez besoin pour effectuer votre travail (matériel, énergie, information, compétence, outils, RH, etc.)?

5.2 Que faites-vous si ces ressources ne sont pas disponibles?

5.3 Qu'est-ce qui fait que ces ressources peuvent ne pas être disponibles?

6. TEMPS

6.1 Quand commencez-vous à faire cette activité? Quels sont les signaux qui vous indiquent de débiter? Par exemple, un certain niveau de qualité, disponibilité, etc.

6.2 Avez-vous un temps requis pour compléter votre travail?

6.3 Que se passe-t-il si vous n'arrivez pas à compléter le travail dans les temps?

6.4 De quelle manière est-ce que la pression de temps affecte votre travail?

7. OUTPUT (extrant)

7.1 Une fois votre travail terminé, qu'est-ce qui en ressort?

7.2 Qu'est-ce qui vous indique que cette section de la structure est terminée?

7.3 Existe-t-il différents modèles de ce produit?

7.4 Comment ces différents modèles affectent-ils votre travail?

8. GÉNÉRALES

8.1 Vous arrive-t-il de devoir faire des ajustements à votre travail?

8.2 Si oui, de quelle manière les faites-vous?

8.3 Comment déterminez-vous comment et quand vous devez faire ces ajustements?

8.4 Est-ce qu'il y a un taux roulement relativement élevé dans ce poste de travail?

8.5 Comment est déterminé qui va travailler à quel poste?

8.6 Que se passe-t-il s'il manque du personnel?

8.7 Est-ce qu'il existe des circonstances que vous devez tolérer ou auxquelles vous devez vous ajuster?

8.8 Quelle est la manière la plus efficace et efficiente d'effectuer ce travail?

8.9 Que faites-vous si quelque chose d'inattendu survient? Par exemple une interruption ou une pause due à une autre tâche plus urgente et plus prioritaire, des ressources non disponibles, etc.?

ANNEXE II

LISTE DES PUBLICATIONS

Article de revue avec comité de pairs

Melanson, A., Nadeau, S. (2018). *Resilience engineering for sustainable prevention in the manufacturing sector: a comparative study of two methods of risk analysis*. Manuscrit soumis pour publication. *Reliability Engineering and System Safety*.

Articles et conférences avec comité de pairs

Melanson, A. et Nadeau, Sylvie. 2014. « L'application des principes de l'ingénierie de la résilience peut-elle permettre une prévention durable, efficace et efficiente dans le contexte de changement que connaît l'ensemble du secteur manufacturier québécois? ». In Congrès AQHSST-RRSSTQ (Mont Sainte-Anne, QC, Canada, 7-9 mai 2014)

Melanson, Annick et Nadeau, Sylvie. (2016). « Managing OHS in complex and unpredictable manufacturing systems: can FRAM bring agility? ». In *Advances in Ergonomics of Manufacturing: Managing the Enterprise of the Future: Proceedings of the AHFE 2016 International Conference on Human Aspects of Advanced Manufacturing, July 27-31, 2016, Walt Disney World®, Florida, USA (Florida, FL, USA, July 27-31, 2016)* Coll. « *Advances in Intelligent Systems and Computing* », vol. 490. , p. 341-348. Springer International Publishing.

Activité de vulgarisation

Melanson, A. (2016). « Gérer la SST dans un environnement manufacturier complexe et imprévisible: Est-ce que l'utilisation du FRAM peut contribuer à augmenter la résilience dans

le secteur manufacturier? ». *Concours d'affiches de l'ÉREST*, École de technologie supérieure, Janvier 2016, Montréal, Canada.

ANNEXE III

ARTICLE: MANAGING OHS IN COMPLEX AND UNPREDICTABLE MANUFACTURING SYSTEM: CAN FRAM BRING AGILITY?

Managing OHS in complex and unpredictable manufacturing systems: Can FRAM bring agility?

Annick Melanson¹, Sylvie Nadeau¹

¹ École de technologie supérieure, Mechanical Engineering Department, 1100 Notre-Dame West, Montreal,
Canada

annickmelanson@hotmail.com
sylvie.nadeau@etsmtl.ca

Abstract. Manufacturing environments have become complex and unpredictable socio-technical systems, and now must cope with existing occupational health and safety (OHS) risks as well as anticipate emergent ones. The subject of this study is a new safety management paradigm called resilience engineering. In a dynamic and ever-changing business environment, socio-technical systems are subject to increasing variability. In this article, we propose an application of a new and innovative systemic risk assessment method for the management of emerging risks in the manufacturing environment, namely the functional resonance analysis method (FRAM). Based on the principles of resilience engineering, this method can be used to determine how variability in daily performance could affect the system and lead to desirable or undesirable events. The results showed clearly the importance of using a risk assessment method based on the variability of performance to manage risks emerging from the changing nature of today's manufacturing companies.

Keywords: Functional Resonance Analysis Method (FRAM) · Resilience Engineering · Risk management · Manufacturing Environment

Introduction

Since the beginning of the industrial era, manufacturing businesses have had to adapt to rapid changes brought by technological innovation, social progress and the opening of international markets. To remain competitive, they must now innovate and upgrade constantly. As a result, they have become complex and unpredictable sociotechnical systems in which interaction between persons and the work environment is creating emergent risks for worker health and safety. Businesses must manage these risks proactively, anticipate them, or at least face them with resiliency. The ability to adapt and adjust quickly using the human resources available within the organization has become a major issue for manufacturing businesses.

In recent years, a new paradigm has taken hold in scientific research on occupational health and safety (OHS) management. Called resilience engineering, this concept is focused on improving system resiliency by analyzing the tasks that workers actually carry out on a daily basis. This makes it a proactive approach in comparison with conventional methods of OHS management. Resilience engineering is based on four fundamental principles (Rigaud, 2011):

- OHS management cannot be based solely on knowledge of past events and calculation of the probability of system failure. It must also be proactive;
- Descriptions of activities are always under-specified. Individuals and organizations must adjust their ways of functioning to meet the needs of the organization using means that take into account the resources (personnel) available. Given the limits on resources and time, these adjustments are inevitably approximate;
- Some harmful events are attributable to system component malfunction or failure, while others are not. In the latter cases, the cause may be a summation of variability among some combination of operations varying within the performance ranges considered normal;
- OHS management cannot be treated independently of operational activities. Safety is a pre-requisite for productivity and profitability and must not be approached as a constraint but as an opportunity to improve operations.

The variability of human performance is at the very heart of resilience engineering. This variability is due to a variety of factors: psychological, social, environmental, organizational, physiological and technological. In today's context of rapid change, businesses must adapt and adjust constantly, and under such conditions, performance variability becomes the flipside of the flexibility required to ensure the smoothness of operations over time (Hollnagel, 2008). The following human capabilities come into play:

- Overcoming inevitable glitches such as design flaws and functional flaws;
- Adjusting performance to meet present demands of a situation;
- Interpreting procedures and applying new ones to adapt to current conditions;
- Detecting improper operation or failure and in many cases taking corrective action.

OHS management in today's manufacturing businesses requires methods of monitoring and managing all types of risks to which workers are exposed. Various methods of system analysis are used to identify risks to diminish or eliminate them. While those used in the manufacturing sector differ in approach, all share the characteristic of focusing primarily on the technical system of the organization. Their main limitation is that they do not consider contextual factors or the impact of these on the occurrence of an undesirable event. Where performance variability is a necessity, these conventional methods do not by themselves provide sufficient understanding of how some accidents occur.

The Functional Resonance Analysis Method (FRAM)

The subject of the present study is the application of a new risk analysis method that takes into consideration the principles of resilience engineering. Called the functional resonance analysis method or FRAM, this method provides a description of how a system ought to function to meet its various objectives, and understanding of how possible variability of functions, alone or in combination, may lead to an event and hence how to avoid the event or improve system functionality. This is the functional resonance principle.

Numerous applications of FRAM have been published (Carvalho, 2011; Pereira, 2013). The results of these studies are conclusive in the sense that FRAM brings a different dimension to the analysis and a way of identifying the types of variability that could be critical to proper system functioning. By taking performance variability into account, the system can be adjusted and adapted to new perturbations and thereby become more resilient.

The aim of this study was to evaluate the application of FRAM as a complement to other risk analysis methods in a manufacturing business. Although this method has been applied successfully in sectors such as health care and air transportation, its added value in terms of risk management remains to be validated in the manufacturing sector.

Methodology

This case study was carried out in a manufacturing company established several decades ago in North America. Employing nearly 1000 persons, the company manufactures and assembles transportation equipment intended for clients all over the continent. Since this is a large company, the project was focused on a specific sector of business activity. Following discussion with the managers, the choice of the sector was agreed upon easily for two reasons: it has the most workplace accidents and the greatest variability of human performance. These two criteria fit perfectly with the objectives of our study.

The study focused in particular on vehicle chassis assembly by a team of welders. This operation involves 26 workstations and about 95 welders distributed over a day shift and an evening shift. These employees may be assigned to one or several workstations throughout their shift, depending on demand.

For the purposes of this study, various means of data collection were used. The two principal sources of data were semi-directed interviews and direct field observations at the workstations. Analyses of data in company documents were also carried out in order to corroborate the information obtained on the shop floor.

Since the principal goal of the study is to evaluate the usefulness of FRAM as a risk analysis tool in the manufacturing sector, the published methodology was followed (Hollnagel, 2012). This consisted essentially of the following steps:

- Identifying and describing the principal functions of the system;
- Characterizing the potential variability of performance for each of these functions;
- Defining an overall performance variability;
- Identifying the consequences of the performance variability.

Experienced welders, team leaders, one process technician, one industrial engineer and one sector supervisor for a total of 11 company employees were interviewed. Through this data gathering process, we developed our understanding and formulated our model of the normal functioning of the system, that is, how it functions in the course of daily activities.

Results

The table below lists the functions identified during interviews of employees. All of the system functions thus identified are of the human type, meaning that employees perform them. It is this type of function that has the greatest potential for variability.

Table 1. – Principal functions of the system under study

1	Planning the production sequence
2	Coordinating the department tasks
3	Supplying the work stations
4	Providing the assembly procedures
5	Constructing the sub-assemblies
6	Assembling the side (wall) structures
7	Assembling the roof structure
8	Finish assembling the roof structure
9	Finishing the welds
10	Standing the structure up
11	Inspecting the structure

The table below describes one of the system functions in terms of the six aspects of FRAM.

Table 2. – Description of the *planning the production sequence* function

Name of function	Planning the production sequence
Description of the function	Production scheduling by the industrial engineering team for each of the workstations within the sector
Aspects	Description of the aspect
Input	General plan of production provided
Output	Production schedule provided
Precondition	Date of manufacture (AM/PM/Evening1/Evening2) known Specifications of vehicles to be produced are determined The materials necessary for supplying the workstations
Resource	Not defined
Control	Not defined
Time	Not defined

The figure below illustrates the nominal model of the system, the model that represents the system as it is supposed to function (work-as-imagined).

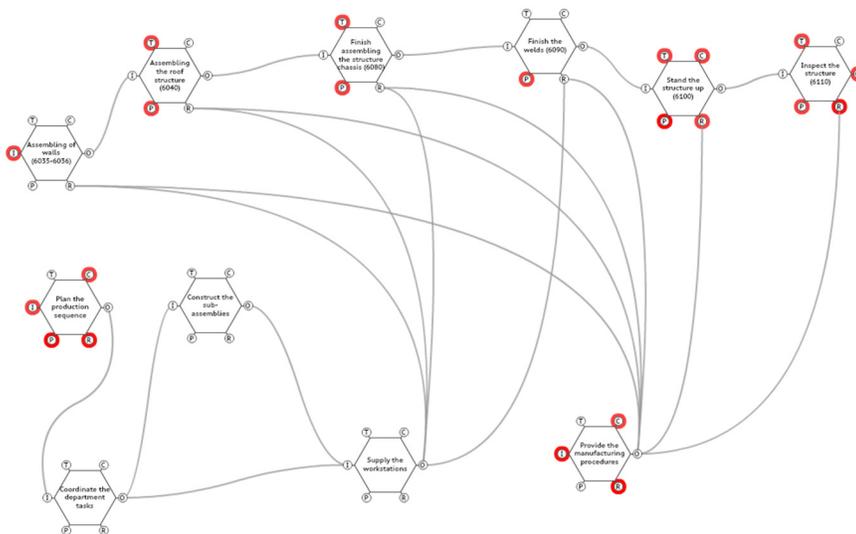


Fig. 3. – Graphical representation of normal system functioning

System instantiation

Variability of an output can have a functional resonance effect on functions downstream. Instantiations made using the nominal model provide understanding of how output variability will have desirable or undesirable effects on the input to the next function in the chain.

Potential variability of the function finish assembling the roof structure

For a variety of reasons, the tasks carried out normally at this workstation are not always completed when the unit advances to the next workstation. For example, a shortage of labor may create some degree of variability in the output from this function. Such shortages may be due to a scarcity of welders or to employee absence caused by illness, workplace accident and so on. This can have repercussions on the system if the company is not able to fill in such absences. In this case, the result might be that it will not be possible to finish the roof structure within the takt time set by the company. The table below illustrates how this will have repercussions on the other functions.

Table 3. – Possible effects on the function finish assembling the roof structure

Upstream function	Output/Input	Downstream function	Variability downstream from the output		Effects on the function downstream
			Time	Precision	
Assembling of the side (wall) structures	Roof structure assembly incomplete	Finishing chassis assembly	On time	Imprecise	Variability ↑

A delay in assembling the roof structure due to a labor shortage will force the shifting of certain operations to the next workstation, since the company is working with a takt time of 4 hours. The chassis will have to move to the next workstation even if not all tasks are completed. The incomplete tasks will be completed under constraints such as:

- Installation of parts at a workstation other than the proper one;
- Installation of parts by employees working overtime (increased fatigue, distraction, etc.);
- Increased work pace;
- Increased number of workers at a workstation;
- Loss of precision due to worker inexperience at unfamiliar workstations;

Discussion

The results obtained by applying FRAM in this manufacturing company demonstrate the importance of taking into account the variability of work performance to ensure the smooth operation of the sociotechnical system. To meet the needs of the company, workers adjust their performance as a function of the human resources available. It is clear that this occurs, since this company is seldom late with its production, in spite of frequent absences of welders.

FRAM is not a standalone risk analysis tool, primarily because it does not provide information about all categories of risk, in particular those associated with equipment or machines. In cases where such categories are relevant, FRAM is suitable as a complementary tool to be used in conjunction with a method such as failure mode effects and criticality analysis (FMECA). In the case of the present study, the risks associated with the principal activity (welding) are well documented in the literature and have been analyzed using methods such as FMECA. However, by neglecting the contribution of performance variability to the occurrence of workplace accidents, manufacturing businesses risk continuing to experience certain types of accidents without identifying their underlying fundamental cause. In these cases, managers inevitably conclude that human error is to blame.

Although FRAM offers several advantages over other risk analysis methods used in the manufacturing sector, it nevertheless has some weaknesses. One of the most significant of these is associated with its entirely qualitative aspect. The value of the results obtained is linked closely to the validity of the data gathering methods. The

construction of a model for use with FRAM is time-consuming and requires thorough knowledge of the system under study. For this reason, it will not always be the method of choice among practitioners.

There are several limitations on the generalization of the results of this research. To begin with, since this is a case study of application to a single manufacturing company that uses very little automation, it provides little insight into how helpful FRAM would be in a highly automated or robotic setting in which human input is limited and highly specific.

The principal advantage of FRAM in the manufacturing sector is that it allows a company to monitor the yield of its production systems and to make adjustments when deemed necessary. This makes it possible to increase system resiliency and robustness, thus allowing quick adaptation to remain competitive in international markets.

Conclusion

Manufacturing businesses need to re-examine their methods of workplace risk management. Many among them still apply a reactive OHS management philosophy based on the concept of human error as an omnipresent factor that is to blame for the occurrence of accidents that are otherwise difficult to explain. They would benefit considerably from taking into account contextual factors and the ways in which workers adjust as resource availability (human or equivalent) fluctuates. This would allow them to adopt a more proactive mode of risk management, one based on the notion that human error is a controllable variable. FRAM meets this criterion.

References

- Carvalho, P.V.R.: The use of Functional Resonance Analysis Method (FRAM) in a mid-air collision to understand some characteristics of the air traffic management system resilience. *Reliability Engineering and System Safety*. 96, 1482-1498 (2011)
- Hollnagel, E.: From protection to resilience. In: 8th International Symposium of the Australian Aviation Psychology Association. Sydney (2008)
- Hollnagel, E.: *FRAM: the Functional Resonance Analysis Method*. Ashgate Publishing Limited, England (2012)
- Macchi, L.: A Resilience Engineering approach to the evaluation of performance variability: development and application of the Functional Resonance Analysis Method for Air Traffic Management safety assessment. *École Nationale Supérieure des Mines de Paris* (2010)
- Pereira, Ana G.A.A.: Introduction to the use of FRAM on the effectiveness assessment of a radiopharmaceutical dispatches process ». In: International Nuclear Atlantic Conference. Brazil (2013)

ANNEXE IV

RÉSUMÉ CONFÉRENCE AQHSST

<p>CONGRÈS AQHSST 2014 BIEN S'OUTILLER POUR INTERVENIR <small>Se développer / Se spécialiser / Se renouveler</small></p> 	<p><i>Congrès AQHSST 7 au 9 mai 2014</i></p>
	<p><i>Proposition de conférence (Grand public)</i> <input type="checkbox"/> <i>Proposition de conférence (Évaluée par le RRSSTQ)</i> <input checked="" type="checkbox"/> <i>Proposition de formation (4 heures)</i> <input type="checkbox"/> <i>Proposition de formation (8 heures)</i> <input type="checkbox"/> <i>Proposition atelier (1 heure)</i> <input type="checkbox"/></p>
<p>PROPOSITION DE COMMUNICATION</p>	
<p>Auteurs : Annick Melanson, étudiante au M. Ing., École de technologie supérieure Sylvie Nadeau, Ing., Ph.D., professeure titulaire, École de technologie supérieure</p> <p>Titre : L'application des principes de l'ingénierie de la résilience peut-elle permettre une prévention durable, efficace et efficiente dans le contexte de changement que connaît l'ensemble du secteur manufacturier québécois?</p>	
<p>Durée de la conférence : 30 min. (excluant 5 minutes de questions)</p>	
<p>Résumé</p> <p>Tous les changements vécus par les entreprises, principalement dans le secteur manufacturier, ont un impact majeur sur l'organisation du travail, sur la santé et la sécurité des travailleurs. Les opérateurs doivent moduler et ajuster leur façon de travailler en fonction d'une production en constante évolution. Ils doivent prendre de plus en plus de décisions et faire preuve d'initiatives, ce qui les confronte à des risques qui jusque-là n'avaient pas encore été évalués. Comment alors une organisation peut-elle s'assurer que les moyens de prévention mis en place dans ce contexte seront durables, efficaces et efficients?</p> <p>Une revue de littérature sur l'ingénierie de la résilience a été faite dans les bases de données Compendex, ScienceDirect, Google Scholars, en utilisant les mots-clés <i>resilience engineering</i> en langue anglaise et française. Cette revue de littérature a été effectuée sur une période de trois mois a recensé les travaux des six (6) dernières années et visait à mieux comprendre ce concept pour voir de quelle manière il pourrait répondre à cette problématique.</p> <p>Les résultats de cette revue de la littérature seront présentés. Plus précisément, les principes les plus prometteurs de l'ingénierie de la résilience visant à permettre à une organisation de mieux anticiper, détecter et faire face aux impacts de ces changements sur la santé et la sécurité du travail seront proposés.</p> <p>Est-ce que les principes de l'ingénierie de la résilience peuvent permettre à une organisation de continuer d'être performante en SST? La confrontation des principes retenus à la réalité de terrains québécois nous permettra d'y apporter un éclairage probant dans un avenir rapproché.</p>	

ANNEXE V

PRÉSENTATION CONFÉRENCE AQHSST

L'application des principes de l'ingénierie de la résilience peut-elle permettre une prévention durable, efficace et efficiente dans le contexte de changement que connaît l'ensemble du secteur manufacturier québécois?

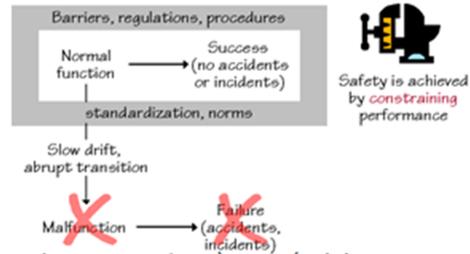
Annick Melanson, étudiante au M.Sc.A, ÉTS
Sylvie Nadeau, Ing. Ph.D

1. INTRODUCTION

- Évolution de la SST au Québec;
- Safety by design – Hollnagel
- Safety by Management - Hollnagel

1. INTRODUCTION

Théorie W (1965-1985)



Une telle approche suppose que le système est sécuritaire parce que:

- Le système a été bien conçu et est maintenu scrupuleusement;
- Les procédures mises en place pour opérer les systèmes sont complètes et correctes;
- Les opérateurs du système se comportent selon les attentes et ont été formés pour cela;
- Les concepteurs peuvent prévoir tous les imprévus et ainsi fournir un système possédant les capacités de réponse adéquates.

Source Hollnagel, E., 2011

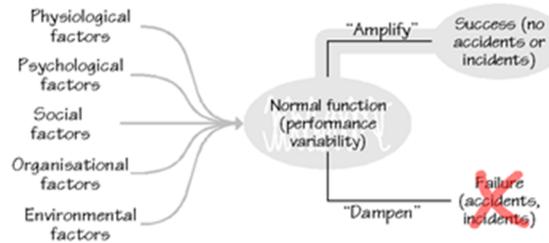
1. INTRODUCTION

Les entreprises d'aujourd'hui:

- Font parties d'un système socio-technique complexe;
- Évoluent rapidement, tant au niveau technologique qu'organisationnel;
- Se modifient rapidement pour répondre aux besoins changeant des clients;
- Instables et donc non prévisibles.

1. INTRODUCTION

Théorie Z



- Les humains apprennent à maîtriser les défauts inévitables;
- Les humains peuvent ajuster leur performance afin de rencontrer les demandes actuelles d'une situation;
- Les humains peuvent interpréter les procédures et les appliquer pour s'adapter aux conditions actuelles;
- Les humains peuvent détecter ce qui échoue ou va mal et peuvent dans bien des cas le corriger.

Source Hollnagel, E., 2011

2. MÉTHODOLOGIE

- Revue de la littérature sur le sujet de 2004 à 2013;
- Une trentaine d'articles ont été consultés;

Bases de données	Mots-clé	Langue	Provenance des articles
Compendex	Resilience Engineering, Safety Management, Resilience	Anglaise	Europe, Moyen-Orient
Science Direct	Resilience Engineering, Safety Management, Resilience	Anglaise	Europe, Moyen-Orient
Google Scholars	Resilience Engineering, Safety Management, Resilience	Anglaise	Europe, Moyen-Orient

3. RÉSULTATS

Qu'est-ce que la résilience?

Un système résilient est défini par son habileté à ajuster son fonctionnement avant, pendant et après des changements et des perturbations de sorte qu'il puisse continuer à fonctionner même après un incident majeur ou en présence d'un stress continu.

Un système résilient accepte la présence constante d'un malaise et reste sensible à la possibilité d'une défaillance. (Hollnagel, Nemeth & Dekker, 2008).

3. RÉSULTATS

Qu'est-ce que l'ingénierie de la résilience (RE)?

L'ingénierie de la résilience est un paradigme en gestion de la sécurité qui vise à **identifier, analyser et améliorer la résilience d'un système** (Saurin et Junior, 2012).

Quels sont les caractéristiques de l'ingénierie de la résilience?

- L'emphase est mis sur comment le succès est obtenu, comment les gens apprennent et s'adaptent en créant de la sécurité **dans un environnement qui possède des défaillances, des risques, des compromis (sécurité vs production) et des objectifs multiples** (Hollnagel, E., 2006).
- Une organisation résiliente traite la sécurité comme une valeur de base, pas comme une commodité qui peut être dénombré. En effet, la sécurité se démontre seulement par les événements qui ne se sont pas produits! (Hollnagel et Woods, 2006).

3. RÉSULTATS

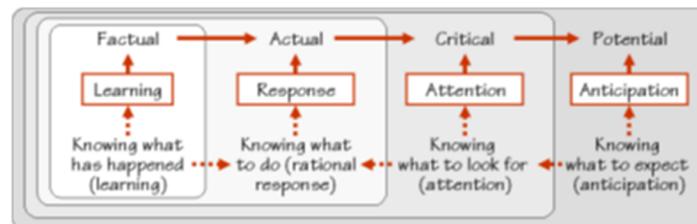
Prémises de l'ingénierie de la résilience:

1. La sécurité ne peut être séparée de la *business*;
2. Il est important de modéliser le fonctionnement normal du système socio-technique puisqu'il est considéré comme une source de défaillance ou de succès;
3. Les systèmes socio-techniques sont imprévisibles et, basé sur cela, les procédures ne peuvent spécifier toutes les situations de travail possibles;
4. Des ajustements locaux sont nécessaires pour s'assurer du fonctionnement du système et de la sécurité.

Source: Saurin et al., 2013

3. RÉSULTATS

Les qualités (principes) d'un système résilient



Source: Hollnagel, 2011

3. RÉSULTATS

Les 4 principes de l'ingénierie de la résilience

1. Engagement de la haute direction:
 - La SST doit être une valeur profonde et non une priorité temporaire
2. Apprentissage:
 - Apprendre des événements et incidents passés mais également du travail normal
3. Flexibilité:
 - L'erreur humaine est inévitable donc le système doit être tolérant aux erreurs;
 - La gestion de la variabilité doit être aussi important que la réduction de la variabilité.
4. Conscience:
 - Il faut être conscient de l'état du système;
 - Cela est critique pour anticiper les changements et pour évaluer les compromis entre la sécurité et la production.

Source: Costello, Saurin et Guimarães, 2008

3. RÉSULTATS

Expériences documentées en ingénierie de la résilience

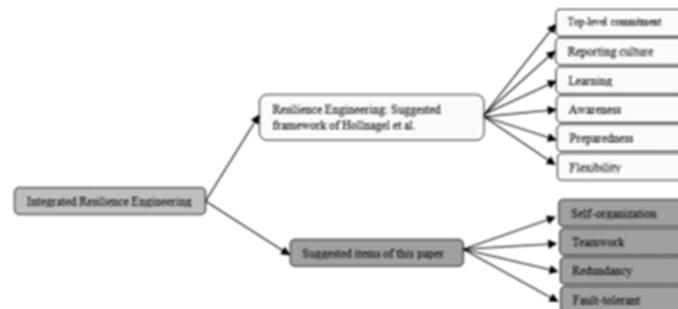
Titre de l'article	Protocole	Principale contribution
A method for assessing health and safety management systems from the resilience engineering perspective (2009)	Étude exploratoire dans une usine de fabrication. Application du MAHS	Développement d'un outil d'audit du système de gestion en SST incluant les principes du RE.
Evaluation and improvement of a method for assessing HSMS from the resilience engineering perspective: A case study of an electricity distributor (2011)	Évaluation avec le MAHS (3 mois) avec les modifications qui y ont été apportées.	Apporte 4 principales modifications au MAHS dont la possibilité de développer un plan d'action.
The design of scenario-based training from the resilience engineering perspective: A study with grid electricians (2013)		Méthode en 3 étapes pour mettre en place un programme de formation basé sur les habiletés de résilience.
A framework for identifying and analyzing sources of resilience and brittleness: A case study of two air taxi carriers (2012)	Étude menée auprès de deux entreprises de Taxi aérien	Propose un cadre pour identifier les sources de résilience et les sources de fragilité d'une entreprise.
Challenge in building RE and adaptive capacity: A field study in a chemical plant (2012)	Étude dans une usine chimique	L'étude a relevé 9 principaux défis dans la mise en place de la IR.
Applying the resilience concept in practice: A case study from the oil and gas industry (2009)	Étude de cas dans une installation de gaz et d'huile en North Sea	Démontre comment la IR peut être utilisée pour diminuer les accidents du travail
Resilience engineering of industrial processes: Principles and contributing factors (2012)	Revue de littérature et opinions d'experts	Proposer des principes et facteurs qui contribuent à la résilience d'un processus

3. RÉSULTATS

Expériences documentées

- Études plutôt axées sur l'identification des sources de résilience et des sources de fragilité d'un système basé sur des expériences passées;
- Expériences dans des systèmes complexes et à très haut risque (pétrochimie, nucléaire, aviation, etc.) où la possibilité d'un évènement catastrophique ne peut être éliminé à 100%;
- Domaine de recherche encore sous-exploité d'où l'émergence constante de nouveaux principes et facteurs contributifs;

4. L'ingénierie de la résilience intégrée



Source: Azaden et al., 2013

5. DISCUSSION

- Difficile à mettre en application à cause de son cadre très conceptuel;
- Très peu de documentation sur la mise sur pied d'un plan d'action pour développer les sources de résilience d'un système;
- Les principes sont très prometteurs puisqu'ils adressent la complexité et le caractère changeant des entreprises d'aujourd'hui;
- Il reste par contre à mettre tous ces principes en pratique.

6. CONCLUSION

- L'ingénierie de la résilience doit être considérée comme un complément, un support à la gestion de la SST;
- L'ingénierie de la résilience marque, en quelque sorte une évolution en matière de gestion de la SST;
- La capacité d'un système à s'ajuster, dans un environnement qui change continuellement est un prédicateur important de la performance future en matière de SST (Azadeh et al., 2013)

Question:

L'application des principes de l'ingénierie de la résilience peut-elle permettre une prévention durable, efficace et efficiente dans le contexte de changement que connaît l'ensemble du secteur manufacturier québécois?

La sécurité est la somme des accidents qui ne se sont pas produits. Alors que la recherche sur les accidents du travail s'est concentrée sur les accidents qui se sont produits en essayant de savoir pourquoi, la recherche en sécurité devrait se concentrer sur les accidents qui ne se sont pas produits et essayer de comprendre pourquoi! – Erik Hollnagel

7. RÉFÉRENCES

- Azadeha, V. S., B. Ashjarib, M. Saberi (2013). "Performance evaluation of integrated resilience engineering factors by data envelopment analysis: The case of a petrochemical plant." *Process Safety and Environmental Protection* 11p.
- G.H.A. Shirali, M. M., I. Mohammadfama, V. Ebrahimipour, A. Moghimbeigi (2012). "Challenges in building resilience engineering (RE) and adaptive capacity: A field study in a chemical plant." *Process Safety and Environmental Protection* 90: 8p.
- H.J. Pasmana, B. K., W.J. Rogers (2013). "A holistic approach to control process safety risks: Possible ways forward." *Reliability Engineering and System Safety* 117: 8p.
- Herrera, L. H. I. A. (2009). "Applying the resilience concept in practice: A case study from the oil and gas industry." *Taylor and Francis Group*: 6p.
- Hollnagel, E. (2011). "From protection to resilience: Changing views on how to achieve safety."
- Hollnagel, E., Woods, David, Leveson, N. (2006). *Resilience Engineering: Concepts and Precepts*, Ashgate Publishing Limited. 397p.
- Linh T.T. Dinh, H. P., Xiaodan Gao, M. Sam Mannan (2012). "Resilience engineering of industrial processes: Principles and contributing factors." *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 25: 8p.

7. RÉFÉRENCES

Marcelo Fabiano Costella, T. A. S. b., Lia Buarque de Macedo Guimarães (2009). "A method for assessing health and safety management systems from the resilience engineering perspective." Safety Science 47: 12p.

Tarcisio Abreu Saurin, G. C. C. J. (2011). "Evaluation and improvement of a method for assessing HSMS from the resilience engineering perspective: A case study of an electricity distributor." Safety Science 49: 14p.

Azad M. Madni, F., IEEE, Scott Jackson (2009). "Towards a Conceptual Framework for Resilience Engineering." IEEE System Journal 3(2): 11p.

Tarcisio Abreu Saurin, G. C. C. J. (2012). "A framework for identifying and analyzing sources of resilience and brittleness: A case study of two air taxi carriers." International Journal of Industrial Ergonomics 42: 12p

Rigaud, É. (2011). Resilience and safety management: ideas for innovating in industrial safety. Number 2011-08

of the Cahiers de la Sécurité Industrielle, Foundation for an Industrial Safety Culture, Toulouse, France (ISSN 2100-3874). Available at <http://www.FonCSI.org/en/>.

Saurin, T. A., et al. (2013). "The design of scenario-based training from the resilience engineering perspective: A study with grid electricians." Accident Analysis and Prevention: 12p.

ANNEXE VI

AFFICHE concours de vulgarisation ÉREST



Gérer la SST dans un environnement manufacturier complexe et imprévisible : Est-ce que l'utilisation du FRAM peut contribuer à augmenter la résilience dans le secteur manufacturier?

Annick Melanson, étudiante au doctorat et Sylvie Nadeau, ing. PhD, professeure • Département de génie mécanique, École de technologie supérieure, Montréal.

1. Contexte et problématique

Les entreprises manufacturières font face à des changements importants; Elles sont devenues des systèmes socio-techniques complexes et imprévisibles; Pour être durables, ces entreprises doivent équilibrer les aléas de production, incluant la gestion de la santé et de la sécurité.

Contexte:

- La gestion de la SST n'a pas évolué au même rythme que les autres systèmes de gestion;
- La gestion de la SST est orientée vers What Went Wrong?
- Malgré le respect des règles et normes, il se produit encore des accidents et des catastrophes



La réalité d'aujourd'hui fait en sorte que:

- Les travailleurs doivent adapter et ajuster leur comportement ou leurs décisions selon les situations d'opération auxquelles ils font face;
- Ces entreprises font face à des risques émergents pour la SST des travailleurs;
- Dans ces conditions, la variabilité de la performance est nécessaire au sein du système socio-technique.
- Les entreprises doivent être résilientes, c'est-à-dire robustes face au prévisible et agiles face à l'incertitude;

2. Méthodologie

Vers un nouveau paradigme en gestion de la SST... L'ingénierie de la résilience

Mode de gestion proactive et complémentaire aux méthodes de gestion traditionnelles (Fig. 2).



La variabilité de la performance peut être pensée de succès (pas d'accidents) ou d'échec (accidents)



Selon les principes de l'ingénierie de la résilience, une méthode d'analyse de risque doit posséder les 4 caractéristiques suivantes:



Le Functional Resonance Analysis Method (FRAM):

- Principe d'adaptation: les tâches sont conçues de façon à ce qu'elles puissent se réaliser par plusieurs chemins différents en cas de panne;
- Principe d'ajustement dynamique: l'opérateur s'ajuste lui-même en fonction de la situation rencontrée dans le cadre de son travail;
- Principe d'émergence: l'opérateur s'ajuste lui-même en fonction de la situation rencontrée dans le cadre de son travail;
- Principe de rétroaction: la rétroaction technique est utilisée pour compenser l'échec des tâches de réalisation en cas d'accident.

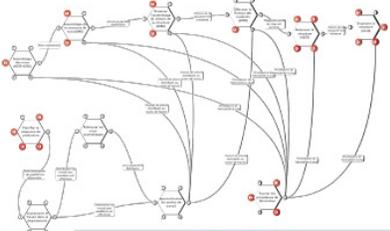
4 étapes pour construire un modèle FRAM :

1. Identification et description des fonctions importantes du système
2. Caractériser la variabilité de la performance potentielle des fonctions du modèle FRAM.
3. Agrégation de la variabilité de la performance
4. Identifier les conséquences de l'analyse

Développer des recommandations sur comment surveiller et influencer la variabilité de la performance.

3. Résultats

Application du FRAM dans une entreprise manufacturière.



Scénario possible
Le scénario analysé est celui où l'assemblage de la structure de toit n'est pas terminé par manque de main d'œuvre.

Fonction en amont	Émergence	Fonction en aval	Temps	Précision	Effets sur la fonction en aval
Assemblage des murs	Structure de toit assemblée non complètement	Effectuer la fixation des structures	À long terme	Impécision	Temps de travail, perte de précision, mauvaise compréhension

Le plupart des méthodes d'analyse de risques utilisées dans le secteur manufacturier visent le système technique. Ces méthodes sont appropriées lorsque les risques de SST sont de nature technique mais très peu efficaces pour évaluer l'impact de la performance de l'humain dans le système socio-technique. Le FRAM devrait être utilisé comme méthode complémentaire à ces méthodes afin de combler ces lacuns.

Une approche systémique comme celle proposée par le FRAM permet de mieux comprendre le fonctionnement réel du secteur étudié en identifiant de quelle façon la variabilité de la performance des travailleurs dans leur travail de tous les jours permet d'éviter certains événements non souhaités. Pour le secteur manufacturier, l'utilisation de cette méthode et des principes de gestion issus de l'ingénierie de la résilience obligent de revoir les façons de faire traditionnelles mais offre un avenir très prometteur concernant la prévention des accidents du travail.



LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Alvarenga, M.A.B., Melo, P.F. Frutuoso, Fonseca, R.A. (2014). A critical review of analysis. *Progress in Nuclear Energy* 75, 25–41.
- Barsky, I. & Dutta, S. P. (1997). Cost assessment for ergonomic risk (CAFER). *Int J Ind Ergon*, 20, 307–315.
- Belmonte, F., Schon, W., Heurley, L., & Capel, R. (2011). Interdisciplinary safety analysis of complex socio-technological systems based on the functional resonance accident model: An application to railway traffic supervision. *Reliability Engineering and System Safety*, 96(2), 237-249.
- Berthe, F. & Vimeux, J. (1997). AMDEC SECURITE, 56ème fiche. Repéré à <http://www.favi.com/wp-content/uploads/2015/10/Fiche-56.pdf>.
- Carvalho, P. V. R. (2011). The use of Functional Resonance Analysis Method (FRAM) in a mid-air collision to understand some characteristics of the air traffic management system resilience. *Reliability Engineering and System Safety*, 96, 1482-1498.
- Carrière, J-B., Dionne-Proulx, J., Beauchamp, Y. (2006). Changement de paradigme à l'œuvre en SST : de la gestion de la SST vers une gestion intégrée SST, environnement et qualité (SST/E/Q). *Revue internationale sur le travail et la société*, 4(1), 76-95.
- Daniellou, F., Simard, M., & Boissière, Y. (2010). *Facteurs humains et organisationnels de la sécurité industrielle : un état de l'art* (Rapport de recherche 2010-02). Toulouse : Fondation pour une culture de sécurité industrielle.
- EU-OSHA (2005). European Agency for Safety and Health at Work Expert forecast on emerging physical risks related to occupational safety and health. Repéré à <http://osha.europa.eu/en/publications/reports/6805478>
- Gagnon, Y.-C. (2012). *L'étude de cas comme méthode de recherche* (2^e éd.). Québec, QC: Presses de l'Université du Québec.
- Hardy, K. (2011). *Contribution à l'étude d'un modèle systémique: le cas du modèle STAMP: application et pistes d'amélioration*. (Thèse de doctorat, ParisTech, Paris, France).
- Herrera, I. A. & Woltier, R. (2010). Comparing a multi-linear (STEP) and systemic (FRAM) method for accident analysis. *Reliability Engineering and System Safety*, 95(12), 1269-1275.

- Hollnagel, E. (2011). *From protection to resilience: Changing views on how to achieve safety*. Communication présentée au 8th International Symposium of the Australian Aviation Psychology Association, Sydney, Australie.
- Hollnagel, E. (2012). *FRAM: the functional resonance analysis method: modeling complex socio-technical systems* (1^{re} éd.). London, England: Ashgate Publishing Limited.
- Hollnagel, E. (2014). *Safety I and Safety II: The past and the future of safety management* (New edition). London, England: Ashgate Publishing Limited.
- Kélada, J. (1994). « L'AMDEC ». L'école des Hautes études commerciales, Centre d'études en qualité totale.
- Landry, G. (2011). AMDEC – Guide pratique. Association française de normalisation
- Larouzzée, J., Guarnieri, F., & Besnard, D. (2014). Le modèle de l'erreur humaine de James Reason. (Rapport de recherche CRC_WP_2014_24). Paris: MINES ParisTech.
- Legendre, A. (2017). *Ingénierie système et Sécurité de fonctionnement : Méthodologie de synchronisation des modèles d'architecture système et d'analyse de risques*. (Thèse de doctorat en ingénierie des systèmes complexes, Université Paris Saclay, Paris, France).
- Leveson, N. (2004). A New Accident Model for Engineering Safer Systems. *Safety Science*, 42(4), 237-270.
- Leveson, N. (2011). *Engineering a safer world: Systems thinking applied to safety*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Liu, H.-C., Liu L., & Liu, N. (2013). Risk evaluation approach in failure mode and effects analysis: a literature review. *Expert SystAppl*, 40, 828–838.
- Luxhoj, J. T. & Kauffeld, K. (2003). Evaluating the Effect of Technology Insertion into the National Airspace System. *The Rutgers Scholar An Electronic Bulletin of Undergraduate Research*, 5. Repéré à <http://rutgersscholar.rutgers.edu/volume05/luxhoj-kauffeld/luxhoj-kauffeld.htm>
- Lux, A., Mawo, J., De Bikond, A., Quillerou-Grivot, E. (2016). FMEA and consideration of real work situations for safer design of production systems, *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, 22(4), 557-564, DOI: 10.1080/10803548.2016.1180856
- Macchi, L. (2010). *Resilience engineering approach to the evaluation of performance variability: development and application of the Functional Resonance Analysis*

Method for Air Traffic Management safety assessment. (Thèse de doctorat en sciences et génie des activités à risque, École Nationale Supérieure des Mines de Paris, Paris, France).

- Organisation internationale de normalisation. (2018a). *Management du risque.* Norme ISO 31001 :18. Genève, Suisse : Organisation internationale de normalisation.
- Organisation internationale de normalisation. (2018b). *Système de management de la santé et de la sécurité du travail – Exigences et lignes directrices pour leur utilisation.* Norme ISO 45001 :18. Genève, Suisse : Organisation internationale de normalisation.
- Ostiguy, C., Lapointe, G., Trottier, M., Ménard, L., Cloutier, Y., Boutin, M., ... Normand, C. (2006). *Les effets à la santé reliés aux nanoparticules* (Rapport de recherche n° R-469). Montréal, QC : Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et sécurité du travail.
- Patriarca R, Di Gravio, G., Constantino, F., Tronci, M. (2017). The functional resonance analysis method for a systematic risk based environmental auditing in a sinter plant: A semi-quantitative approach. *Environmental Impact Assessment Review*, 63, 72-86.
- Pereira, Ana G.A.A. (2013). Introduction to the use of FRAM on the effectiveness assessment of a radiopharmaceutical dispatches process. In: International Nuclear Atlantic Conference. Brazil.
- Perrow, C. (1984). *Normal Accidents: Living with High-Risk Technologies.* Princeton, NJ: Princeton University Press.
- Qureshi Z.H. (2007). A Review of Accident Modelling Approaches for Complex Socio-Technical Systems. *12th Australian Workshop on Safety Related Programmable Systems, SCS'07, Adelaide, Australia, August 30 -31, 2007*, 86, (pp.47-59). Adelaide, Australia: Tony Cant Ed.
- Qureshi, Zahid H. 2008. « A review of Accident Modelling Approaches for complex Socio-Technical Systems ». Australia, 72 p.
- Rasmussen, J. (1997). Risk Management in a Dynamic Society: A Modelling Problem. *Safety Science*, 27(2/3), 183-213.
- Rhee, S.-J., & Ishii, K. (2003). Using cost based FMEA to enhance reliability and serviceability. *ADV ENG INFORM*, 17, 179– 188.

- Rigaud, É. (2011). *Resilience and safety management: ideas for innovating in industrial safety*. (Rapport technique N° 2011-08). Toulouse, France : Les cahiers de la sécurité industrielle, Foundation for industrial safety culture.
- Robert, B. (2009). *Résilience organisationnelle : Concepts et méthodologie d'évaluation*. Presses internationales Polytechnique. Montréal, Québec 52p.
- Rosa, L. V., Haddad, A. N., & Carvalho, P. V. R. (2015). Assessing risk in sustainable construction using the Functional Resonance Analysis Method (FRAM). *Cogn Tech Work, 17*, 559-573.
- Slim, H., Nadeau, S., & Morency, F. (2018a). FRAM: A complex system's approach for the evaluation of aircraft on-ground deicing operations. In Gesellschaft für Arbeitswissenschaft (Frankfort, Allemagne, Fev. 21-23, 2018) Coll. « Kongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft », vol. 64. GFA Press
- Slim, H., Nadeau, S., & Morency, F. (2018b). The application of the Functional Resonance Analysis Method (FRAM) to evaluate factors affecting times-to-completion and graduation in graduate studies. In Gesellschaft für Arbeitswissenschaft (Frankfort, Allemagne, Fev. 21-23, 2018) Coll. « Kongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft », vol. 64. GFA Press.
- Subburaman, K. A. (2010). *Modified FMEA approach to enhance reliability of lean systems*. (Master's thesis, University of Tennessee, Knoxville, TN).
- Tian, J., Wu, J., Yang, Q., & Zhao, T. (2016). FRAMA: A safety assessment approach based on Functional Resonance Analysis Method. *Safety Science, 85*, 41-52.
- Trist, E. (1981). Evolution of Socio Technical Systems. *Occasional Paper, 2*, 1-67.
- Village, J., Annett, T., Lin, E., Greig, M., & Neumann, W. P. (2011). Adapting the failure modes effect analysis (FMEA) for early detection of human factors concerns. Proceedings of the 42nd annual conference of the Association of Canadian Ergonomists, London, Ontario, October 17-20

