

Développement d'une approche d'aide à la maitrise des risques dans les activités de maintenance d'une chaine logistique : Approche par modélisation et simulation basée sur les systèmes multi-agents

Maryam Gallab

▶ **To cite this version:**

Maryam Gallab. Développement d'une approche d'aide à la maitrise des risques dans les activités de maintenance d'une chaine logistique : Approche par modélisation et simulation basée sur les systèmes multi-agents. Gestion et management. Université Paris sciences et lettres; École Mohammadia d'ingénieurs (Rabat, Maroc), 2017. Français. NNT : 2017PSLEM028 . tel-01745895

HAL Id: tel-01745895
https://pastel.hal.science/tel-01745895

Submitted on 28 Mar 2018

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

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

THÈSE DE DOCTORAT

de l'Université de recherche Paris Sciences et Lettres

PSL Research University

Préparée dans le cadre d'une cotutelle entre

MINES ParisTech

et Ecole Mohammadia d'Ingénieurs (EMI)

Development of an approach to risk management in supply chain maintenance activities: Modelling and Simulation approach based on Multi-Agent Systems.

Développement d'une approche d'aide à la maîtrise des risques dans les activités de maintenance d'une chaîne logistique : Approche par Modélisation et Simulation basée sur les Systèmes Multi-Agents.

Ecole doctorale n° 432

Sciences et Métiers de l'Ingénieur

Spécialité Sciences et Génie des Activités à Risque

COMPOSITION DU JURY :

M. Mohamed SOUISSI
EMI Rabat, Rapporteur

M. Said ACHCHAB
ENSIAS Rabat, Rapporteur

M. Jean Marie FLAUS
PolyTech Grenoble, Rapporteur

Mme. Rajae ABOULAICH
EMI Rabat, Présidente

Mme. Hafida BOULOIZ
ENSA Agadir, Examinatrice

M. Mohamed TKIOUAT
EMI Rabat, Examinateur

M. Emmanuel GARBOLINO
Mines ParisTech, Examinateur

Soutenue par Maryam GALLAB

Le 05 Juin 2017

Dirigée par **Emmanuel GARBOLINO**

Je dédie ce travail

A

Mes chers grands parents et Mes chères tantes

Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour et l'estime que j'ai pour vous…

Symboles de bonté par excellence, vous êtes la source de tendresse et de dévouement qui n'a cessé de m'encourager et de prier pour moi…

Que Dieu Tout Puissant vous protège et vous accorde santé et longue vie…

A

Mes chers parents, Frères et Sœurs

Pour leur aide, leur affection et leur amour. Puisse Dieu vous donner une vie pleine de succès, de joie et de bonheur…

A

Tous mes amis (es)

Pour leur loyauté, encouragement, soutien et engagement…

A

Tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail…

Maryam



REMERCIEMENT

« Il n'y a guère au monde un plus bel excès que celui de la reconnaissance »

Jean de la Bruyère

C'est avec une immense gratitude que je me dois exalter la reconnaissance que j'ai envers les personnes qui m'ont encouragées et soutenues tout au long de ma thèse.

Mes profonds remerciements vont à ma très chère Co-encadrant Professeur **BOULOIZ H**afida, non seulement pour sa rigueur scientifique, son aide permanent, mais aussi pour la confiance qu'elle n'a jamais cessé de témoigner pour mon égard, pour sa gentillesse extraordinaire et pour ses encouragements dans des moments où je commence à perdre l'espoir. Elle a fait preuve d'une patience remarquable pour me motiver et me mettre sur la bonne voie afin de mener à bien ce travail. Je voudrais lui adresser ma plus profonde reconnaissance et lui dire toute mon admiration pour ses valeurs tant humaines que professionnelles. Vraiment les mots me manquent pour exprimer ma gratitude et ma reconnaissance envers elle.

Je tiens à exprimer mes plus vifs remerciements au Professeur **TKIOUAT M**ohamed, mon directeur de thèse à l'Ecole Mohammadia d'Ingénieurs (EMI) pour son encadrement continu, pour ses remarques constructives qu'il m'a fournies ainsi que pour ses précieux conseils durant toute la période de ma thèse. Je le remercie également pour la confiance qu'il m'a accordée et pour la grande liberté d'idées et de travail qu'il m'a donné. En dehors de ses apports scientifiques, je n'oublierai pas aussi de le remercier pour ses qualités humaines, son hospitalité et son soutien permanent qui m'ont permis de mener à bien ma thèse doctorat.

Je suis très reconnaissante à M. **GARBOLINO E**mmanuel, mon directeur de thèse à l'Ecole des Mines de Paris pour les nombreuses discussions, suggestions et remarques constructives qui m'ont permis d'améliorer mes connaissances et la qualité de cette thèse, je le remercie également d'avoir fait preuve d'une patience remarquable pour me motiver et me mettre sur la bonne voie lors de mon séjour en France pour achever ce travail.

En parlant de mon séjour, je n'oublierai pas d'adresser mes chaleureux remerciements à M. **GUARNIERI F**ranck pour m'avoir accueilli au sein du Centre de Recherche sur les Risques et les Crises (CRC), ainsi que l'ensemble du personnel du CRC particulièrement Mme **SANSEVERINO-GODFRIN V**alérie pour le temps qu'elle a consacré à mon dossier d'inscription et pour la gentillesse dont elle a fait preuve à mon égard. Une grande pensée à une précieuse personne que j'ai rencontré à CRC, **OUEIDAT D**ahlia, pour sa gentillesse et sa tendresse.

Un grand merci à M. **BUREAU N**icolas, Chef de Centre Emplisseur de Saint Pierre des Corps de l'entreprise PRIMAGAZ de m'avoir fourni un terrain d'expérimentation avec les données dont j'avais besoin et qui a consacré son temps pour contribuer aussi dans ce travail.

Ma gratitude et mes sincères remerciements vont à Mme **ABOULAICH R**ajae, responsable de laboratoire LERMA, pour sa gentillesse, son soutien et ses directives, et d'avoir accepté sans hésitation d'être la présidente de mon jury.

Je remercie le Professeur **ACHCHAB S**aid de l'ENSIAS de rapporter mon travail. Ses conseils et ses remarques pertinentes m'ont été très utiles.

Un grand merci au Professeur **SOUISSI M**ohamed de l'EMI qui m'a fait l'honneur d'accepter d'être rapporteur. Je le remercie vivement pour le temps qu'il a consacré à la lecture de ce manuscrit.

Je remercie également M. **J**ean **M**arie **FLAUS** professeur à l'Université Joseph Fourier, Polytech Grenoble d'avoir accepté de rapporter mon travail.

Je ne manquerai pas l'occasion pour remercier M. **ELLAIA R**achid, et M. **NAJIB K**halid pour leurs conseils et leurs encouragements.

Un remerciement va également au Laboratoire **LIRIMA** pour le soutien financier de mon séjour lors de ma participation au congrès SAI à Londres / UK.

Mes vifs remerciements sont aussi adressés au Centre de Recherche CERIQ de l'Ecole HESTIM-Casablanca qui m'a fourni une bourse de six mois avec un suivi de recherche de la part de M. **CHATER Y**ouness et M. **ABID Y**assine. Je tiens vraiment à les remercier pour leurs conseils, leurs remarques pertinentes, leurs encadrements et leurs discussions enrichissantes qui m'ont été très utiles.

Je voudrais profiter pour remercier le directeur de l'EMI, le directeur de CEDOC ainsi que le corps administratif particulièrement Mme Leila, Mme Zohra **LAKROMBI**, Mme Souad **ELHADDAD** et Mme Sophia **BOHAMIDI** pour leurs sympathies. Je ne pourrai pas oublier ma deuxième famille LERMA où j'ai appris beaucoup de choses qui ont changé ma façon de penser, mes remerciements s'adressent premièrement aux associés : **DAROUICHI** Aziz, **MOUSSAID** Noureddine, **KAICER** Mohamed, **ELALEM** Wafae, **ELHADAF** Houda, **OUHIMOU** Siham, **ELMOUDEN** Samira qui ont été toujours là pour partager avec nous leurs expériences et pour nous remonter le moral par leurs encouragements. Je cite également **YACHOU** Najlae, **GANNOUNI** Asma, **BELMAATI** Fatima-Ezzahra, **TCHVAGHA ZEINE** Ahmed, **TABBAKH** Zineb avec qui j'ai partagé des moments inoubliables. Une personne qui m'est très chère à qui j'ai beaucoup de reconnaissance, avec qui j'ai partagé des moments précieux que je ne vais jamais les oublier, qui a été toujours avec moi dans les bons moments comme dans des moments difficiles entrain de m'encourager et de me consoler : **MEDARHRI** Ibtissam. Bassoum ma chérie je ne trouve pas les mots pouvant exprimer mes sentiments pour toi, tout simplement je te considère comme une sœur.

Cette thèse est le fruit de plusieurs années de travail. Ces années ont été parfois enthousiasmantes, parfois difficiles. Beaucoup d'amis m'ont aidé, sans hésitation, à faire face aux moments les plus difficiles et ils ont partagé avec moi de beaux moments : **Maria** (ma meilleure amie d'Agadir qui n'a jamais hésité pour me secourir aux moments difficiles), Fatima **SANNADI** (une amie très très chère à mon cœur), Meriem **AMINE** (qui était ma colocatrice à l'ENSMR, et maintenant une précieuse amie), **Kaoutar Kenitra** et **Kaoutar France** (pour les moments inoubliables que nous avons passé ensemble), et ma clique de l'ENSA: **Wassim et Mahfoud** (pour leurs encouragements et leurs aides: ils étaient avec moi lorsque je découvre la 1ère fois la plateforme AnyLogic), **Hassan** (pour son humour), **Bouchra** (pour ses encouragements). Je voudrais remercier tous ceux que j'ai oublié de mentionner.

Si cette thèse a pu aboutir, le mérite va spécialement à ma très chère famille. Je pense tout d'abord à mes grands parents, mes parents et mes tantes (**Fatima, Safia, Saadia, Zineb**) sans eux je ne serais pas ce que je suis aujourd'hui, j'espère que je serai votre fierté. J'adresse toute mon affection à mon petit frère Mohamed et ma très chère petite sœur Asma qui ont été toujours à mes côtés pour me soutenir et m'encourager. Je tiens à remercier également mes cousines **Adila, Asma, Kaoutar** pour leurs accueils, leurs supports et leurs plats délicieux. Sans oublier mes petites cousines **Chaimae** et **Ihssane** avec qui j'ai partagé des moments agréables.

Enfin, je saisie l'occasion pour exprimer ma gratitude envers toutes les personnes ayant contribué de près ou de loin à l'achèvement de ce travail.

A toutes ces personnes … *Merci*

RÉSUMÉ

La maintenance est considérée comme une activité indispensable au sein d'une entreprise, dans le but d'assurer le fonctionnement du système industriel et de garder les équipements dans un état satisfaisant pour l'exécution des fonctions prévues. Cependant, les activités de maintenance sont identifiées comme des situations potentiellement critiques et présentent des risques qui peuvent conduire à des accidents graves.

Cette thèse a pour objectif principal de développer un simulateur multi-agents pour concevoir un système d'aide à la maîtrise des risques des activités de maintenance. Le but est d'explorer la complexité de la maintenance et de spécifier les interactions entre la fonction maintenance, l'analyse et l'évaluation des risques.

Nous nous intéressons d'une part, à concevoir un modèle systémique permettant d'identifier et de modéliser un système industriel, à montrer les différentes interactions entre ses éléments, à analyser et évaluer les risques des activités de maintenance. Nous proposons la méthode MOSAR et le langage UML pour concevoir un modèle cognitif de référence. Ce modèle a servi de point de départ pour la conception d'une base de données à l'aide du langage SQL, qui est exploitée dans le modèle Multi-Agents afin d'acquérir les informations nécessaires à son fonctionnement.

D'autre part, nous développons une architecture d'un Système Multi-Agents qui a pour vocation d'anticiper les situations de défaillances et la prise de décisions à l'aide de la simulation du comportement du système étudié. Une comparaison entre les plateformes existantes dédiées aux Systèmes Multi-Agents est effectuée pour choisir la plateforme adéquate à notre problématique pour la réalisation de la simulation.

Finalement, les modèles développés sont appliqués dans le cadre d'une chaîne logistique pour le chargement et le déchargement de GPL (Gaz de Pétrole Liquéfié) de l'entreprise PRIMAGAZ-France. Un simulateur a été développé à l'aide de la plateforme AnyLogic dans le but d'étudier le comportement du système et de simuler les scénarios de défaillances choisis par l'industriel pour le calcul de la criticité à partir de trois paramètres (fréquence, gravité, détectabilité) et l'obtention d'un Tableau de Bord contenant un ensemble d'indicateurs de performance de la maintenance. Les modèles de simulation proposés permettent d'orienter les industries vers les bonnes décisions pour éviter les situations à risques pouvant déclencher des événements perturbateurs dommageables.

Mots clés :

Maintenance; Analyse des risques; Modélisation; Simulation; Complexité; Approche systémique; Systèmes Multi-Agents; chaîne logistique GPL, plateforme AnyLogic.

ABSTRACT

The maintenance is regarded as an essential activity within a company, in order to ensure the industrial system operation and to keep the equipment in a satisfactory state for the performance of the intended functions. However, the maintenance activities are identified as critical situations and present risks that can lead to serious accidents.

The main objective of this thesis is to develop a multi-agent approach to designing a model to overcome risks of maintenance activities. The aim is to explore the maintenance complexity and to indicate the interactions between the maintenance function and the risk assessment.

Firstly, we are interested in designing a systemic model to identify and model the industrial system, to show the different interactions between its elements, to analyze and to evaluate risks of maintenance activities. We propose the MOSAR method and the UML language to design a cognitive reference model. This model served as a starting point for designing a database using the SQL language, which is operated by Multi-Agent model to acquire the necessary information for its operation.

On the other hand, we develop a framework of a multi-agent system that aims to anticipate failures scenarios and the decision-making by simulating the studied system behaviour. A comparison between the existing platforms dedicated to Multi-Agent Systems is performed to choose the appropriate platform for the simulation.

Finally, the developed models are applied in the LPG supply chain (Liquefied Petroleum Gas) of PRIMAGAZ-France. A simulator was developed using the AnyLogic platform to study the system behaviour and to simulate the failure scenarios chosen by the industry, for the calculation of the criticality from three parameters (Frequency, severity, detectability), and for obtaining a Dashboard containing a set of maintenance performance indicators. The proposed simulation models help to guide the industries toward good decisions to avoid risky situations that may trigger disruptive events damaging.

Keywords:

Maintenance; Risk analysis; Modelling; Simulation; Complexity; Systemic approach; Multi-Agent System; LPG supply chain, AnyLogic Platform.

LISTE DES ACRONYMES

ADR : Accord Européen relatif au Transport International des marchandises Dangereuses par Route

AMDEC: Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets et leur Criticité

ARIA : Analyse Recherche et Information sur les Accidents

ATEX : Atmosphères Explosibles

BDD: Base De Données

BDI: Believes, Desires, Intentions

BLEVE: Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion

CISC: Coupleur Intelligent de Sécurité pour Camion GPL

DCMT: Dispositif de Contrôle de Mise à la Terre

ERP : Entreprise Resource Planning (progiciel de gestion intégré)

ERV: Exploitant Relais Vrac

FRAM: Functional Resonance Accident Model

GPL : Gaz de Pétrole Liquéfié

IA : Intelligence Artificielle

IAD : Intelligence Artificielle Distribuée

INERIS : Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques

KPI : Key Performance Indicators

LIE: Limite Inférieure d'Explosivité

MADS : Méthode d'Analyse des Dysfonctionnements des Systèmes

MMR: Mesure de Maîtrise des Risques

MMRi : Mesures de Maîtrise des Risques instrumentées

MOSAR : Méthode Organisée et Systémique de l'Analyse des Risques

MTBF: Moyenne des Temps de Bon Fonctionnement

MTTR: Mean Time To Repair

OHSAS: Occupational Health and Safety Advisory Services

RID: Règlement concernant le Transport International Ferroviaire des Marchandises Dangereuses.

SEI: Seuils des Effets Irréversibles

SEL: Seuils des Effets Létaux

SELS: Seuils des Effets Létaux Significatifs

SGBD: Système de Gestion de Base de Données

SMA: Système Multi-Agents

SQL: Structured Query Language

STAMP: Systems Theoretic Accident Model and Processes

UML: Unified Modelling Language

UVCE: Unconfined Vapour Cloud Explosion

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENT 3
RÉSUMÉ 5
ABSTRACT 6
LISTE DES ACRONYMES 7
TABLE DES MATIÈRES 9
LISTE DES TABLEAUX 17
INTRODUCTION GÉNÉRALE 19
1. OBJECTIF GLOBAL 21
2. CONTEXTE DU TRAVAIL 22
3. MÉTHODOLOGIE 22
4. STRUCTURE DE LA THÈSE 24
5. CONTRIBUTIONS DE RECHERCHE 24

CHAPITRE I : LA MAINTENANCE DANS L'INDUSTRIE : ENJEUX ET LIMITES 27

INTRODUCTION 28
1. GÉNÉRALITÉS 28
1.1. Concepts et définitions 28
1.2. Historique et Evolution 29
1.2.1. 1ère génération 29
1.2.2. 2ème génération 30
1.2.3. 3ème génération 30
1.2.4. Génération récente 30
1.3. Objectifs de la maintenance 31
1.4. Niveaux de maintenance 32
1.5. Formes d'organisation de la maintenance 33
2. TYPES DE MAINTENANCE 33
2.1. La maintenance corrective 33
2.1.1. Maintenance Palliative 33
2.1.2. Maintenance Curative 34
2.2. La maintenance préventive 34
2.2.1. Maintenance Systématique 34
2.2.2. Maintenance Conditionnelle 35

2.2.3. Maintenance Prévisionnelle 35
2.3. La maintenance à échelle majeure 35
2.3.1. Maintenance Améliorative 35
2.3.2. Travaux Neufs 35
3. LES RISQUES ET LES ACCIDENTS DANS LES ACTIVITÉS DE MAINTENANCE 37
3.1. Les accidents liés aux activités de maintenance 37
3.2. La maintenance comme une activité dangereuse 38
3.3. Les dangers liés aux activités de maintenance 40
4. CONCLUSION 41
BIBLIOGRAPHIE 41

CHAPITRE II : PRÉSENTATION DU TERRAIN D'EXPÉRIMENTATION 44

INTRODUCTION 45
1. LES ACTIVITÉS DE GAZ DE PÉTROLE LIQUÉFIÉ : GPL 45
2. LES ACCIDENTS LIÉS AUX ACTIVITÉS DE GPL ET LES DANGERS ASSOCIÉS 46
2.1. Les accidents liés aux activités de maintenance dans la chaîne logistique de GPL 46
2.2. Les phénomènes dangereux consécutifs aux accidents de GPL 47
2.2.1. Le BLEVE 47
2.2.2. L'UVCE 48
2.2.3. Le Jet Enflammé 49
3. L'ÉTUDE DE CAS: LE SITE DE STOCKAGE ET DE DISTRIBUTION DE GPL 49
3.1. Présentation de l'entreprise d'accueil : PRIMAGAZ 49
3.2. Le Site Relais Vrac 50
3.3. Opérations de chargement/déchargement 53
4. LES ACTIVITÉS DE MAINTENANCE DANS LA CHAÎNE LOGISTIQUE DE GPL 56
4.1. Fonction de maintenance au sein du site relais vrac 56
4.2. Consignation des opérations de maintenance 57
5. CONCLUSION 59
BIBLIOGRAPHIE 59

CHAPITRE III : COMPLEXITÉ D'UN SYSTÈME ET APPROCHE SYSTÉMIQUE 60

INTRODUCTION 61
1. COMPLEXITÉ ET SYSTÈME COMPLEXE 61

1.1. Histoire de la complexité 62
1.2. Système complexe 63
1.3. Propriétés de la complexité 64
2. APPROCHE SYSTÉMIQUE : CONCEPTS ET OUTILS 66
2.1. Concept « Système » 66
2.2. La pensée Systémique 66
2.3. L'approche Systémique 67
2.4. Les grands concepts de la systémique 67
2.4.1. L'interaction 67
2.4.2. La globalité 68
2.4.3. L'organisation 68
2.4.4. La complexité 68
2.5. Les étapes de la démarche systémique 68
2.5.1. Analyse de système ou exploration systémique 69
2.5.2. Modélisation qualitative 69
2.5.3. Modélisation dynamique ou simulation 69
3. MODÉLISATION SYSTÉMIQUE 69
3.1. Modèle et Modélisation 70
3.2. Différents types de modèles 71
3.3. Méthodes de modélisation 72
3.3.1. Dynamique des systèmes 73
3.3.2. Modèles Analytiques 74
3.3.3. SADT/FIS 74
3.3.4. Langage UML 74
3.4. Choix de la méthode de modélisation 75
4. MAINTENANCE COMME ÉTANT UN SYSTÈME COMPLEXE 76
5. CONCLUSION 77
BIBLIOGRAPHIE 77

CHAPITRE IV : MODÈLE CONCEPTUEL POUR L'ANALYSE ET L'ÉVALUATION DES RISQUES DES ACTIVITÉS DE MAINTENANCE 83

INTRODUCTION 84
1. ANALYSE DES RISQUES INDUSTRIELS 84
1.1. Définitions et concepts 84

1.1.1. Risque (Risk) 84
1.1.2. Sécurité (Safety) 84
1.1.3. Sûreté de fonctionnement (Dependability) 85
1.1.4. Différentes Notions 85
1.2. Analyse des risques dans le processus de management des risques 86
1.2.1. Management des risques 86
1.2.2. Analyse des risques 87
1.2.3. Evaluation des risques 87
1.2.4. Maîtrise des risques 88
2. MÉTHODES D'ANALYSE DES RISQUES ET LEURS LIMITES 88
2.1. Classification des méthodes d'Analyse des risques 88
2.2. Panorama des méthodes d'analyse des risques et leurs évolutions 89
2.3. Limites des méthodes d'analyse des risques dans la maintenance 93
3. MODÈLE CONCEPTUEL POUR L'ANALYSE ET L'ÉVALUATION DES RISQUES DES ACTIVITÉS DE MAINTENANCE 95
3.1. Identification et modélisation du système 97
3.2. Identification des dangers et les principaux scénarios d'accidents 98
3.3. Quantification des risques 99
4. CONCLUSION 103
BIBLIOGRAPHIE **102**

CHAPITRE V : SIMULATION PAR LES SYSTÈMES MULTI-AGENTS 106

INTRODUCTION 107
1. LA SIMULATION: CONCEPTS ET GÉNÉRALITÉS 107
2. L'APPROCHE MULTI-AGENTS 109
2.1. Agents 110
2.1.1. Définitions et caractéristiques 110
2.1.2. Types d'agents 112
2.1.3. Quelques architectures Agents 113
2.2. Système Multi-Agents 113
2.2.1. Définition et caractéristique 113
2.2.2. Environnement des SMA 116
2.2.3. Applications des SMA dans le domaine industriel 117
2.2.4. Intérêts et choix des SMA 117

3. LES MÉTHODES DE CONCEPTION DES SYSTÈMES MULTI-AGENTS 118
4. LES PLATEFORMES DES SYSTÈMES MULTI-AGENTS 119
5. LA PLATEFORME ANYLOGIC® 123
5.1. Définition 123
5.2. Avantages de la plateforme AnyLogic 123
5.3. Applications de la plateforme AnyLogic 124
5.4. Intérêts et choix de la plateforme AnyLogic 124
6. ARCHITECTURE DU MODÈLE PROPOSÉ 124
6.1. Objectif du modèle proposé 125
6.2. Architecture technique pour la conception d'un SMA 125
6.3. Méthode de conception d'un SMA 126
6.3.1. Les Agents 126
6.3.2. Les interactions 132
6.3.3. L'organisation 134
6.3.4. L'environnement 136
7. CONCLUSION 136
BIBLIOGRAPHIE 136

CHAPITRE VI : APPLICATION ET DISCUSSION DU MODÈLE PROPOSÉ 142

INTRODUCTION 143
1. MODÉLISATION DU SYSTÈME POUR L'ANALYSE DES RISQUES DES ACTIVITÉS DE MAINTENANCE 143
1.1. Identification et modélisation du système 143
1.1.1. Le compresseur 144
1.1.2. La pompe 144
1.1.3. Le bras Gaz/ Liquide 145
1.1.4. Les détecteurs Gaz/Flamme 145
1.2. Identification des dangers et les principaux scénarios d'accidents 148
1.3. Quantification des risques 151
1.3.1. Gravité 151
1.3.2. Probabilité 151
1.3.3. Détectabilité 152
1.4. Mesures de sécurité 153
2. SIMULATION DU COMPORTEMENT DU SYSTÈME ETUDIÉ 156

2.1. Simulation du système en fonctionnement normal 157
2.1.1. Vérification Camion 157
2.1.2. Opérations de chargement 158
2.1.3. Opérations de déchargement 159
2.2. Simulation des scénarios de défaillance 161
2.3. Simulation des Indicateurs de Performance de Maintenance (KPIs) 165
3. DISCUSSION DES RÉSULTATS 170
3.1. L'apport du modèle MOSAR-UML 170
3.2. L'apport de la simulation multi-agents sur la plateforme AnyLogic 173
4. CONCLUSION 176
BIBLIOGRAPHIE 176

CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES 178

BIBLIOGRAPHIE GÉNÉRALE 181

GLOSSAIRE 196

ANNEXE 198

ANNEXE A : Scénarios de Défaillance 198
ANNEXE B : Code et Variables de la Simulation AnyLogic 198
ANNEXE C : Justification de choix des scénarios de défaillance par l'industrie 198

LISTE DES FIGURES

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Figure i. 1. La méthodologie adoptée. 23
Figure i. 2. Les étapes de modélisation-simulation d'analyse des risques des activités de maintenance. 24

CHAPITRE I : LA MAINTENANCE DANS L'INDUSTRIE : ENJEUX ET LIMITES

Figure I. 1. Evolution de la maintenance dans le temps. 29
Figure I. 2. Les objectifs de la maintenance. 31
Figure I.3.Types de Maintenance. 36

CHAPITRE II : PRÉSENTATION DU TERRAIN D'EXPÉRIMENTATION

Figure II. 1. Les différentes étapes de la formation d'un BLEVE (Shield, 1993). 48
Figure II. 2. Formation d'un UVCE (inspiré de circulaire 10 mai 2002). 49
Figure II. 3. Cartographie du site Relais Vrac. 51
Figure II. 4. Représentation du Site Relai Vrac. 52
Figure II. 5. Représentation des équipements sélectionnés. 52
Figure II. 6. Le modèle UML du site Relais Vrac. 53
Figure II. 7. Diagramme de séquences des opérations de chargement/déchargement. 55
Figure II. 8. Diagramme de classe des opérations de maintenance. 56
Figure II. 9. Consignation des opérations de maintenance. 58

CHAPITRE III : COMPLEXITÉ D'UN SYSTÈME ET APPROCHE SYSTÉMIQUE

Figure III. 1. Démarche de construction d'un modèle de simulation 68

CHAPITRE IV : MODÈLE CONCEPTUEL POUR L'ANALYSE ET L'ÉVALUATION DES RISQUES DES ACTIVITÉS DE MAINTENANCE

Figure IV. 1. Processus de management des risques (ISO, 2010). 86
Figure IV. 2.Typologie des méthodes d'analyse des risques 89
Figure IV. 3. Modèle MADS (Perilhon, 2000). 91
Figure IV. 4. Structure de la méthode MOSAR inspiré de (Perilhon, 2000). 92
Figure IV. 5. Modèle MOSAR-UML pour l'Analyse des risques des activités de maintenance 96
Figure IV.6. Diagramme de classe pour l'identification et la modélisation du système. 97
Figure IV. 7. Cas d'utilisation de l'identification du système. 98
Figure IV. 8. Diagramme de classe pour l'identification des dangers. 98
Figure IV. 9. Processus d'apparition d'un dommage. 99
Figure IV. 10. Diagramme de classe pour la quantification des risques. 99
Figure IV. 11. Extrait de la Base de données. 101

CHAPITRE V : SIMULATION PAR LES SYSTÈMES MULTI-AGENTS

Figure V. 1. Principe de la simulation selon Drogoul (1993). 108
Figure V. 2. Représentation d'un agent en interaction avec son environnement et les autres agents. 116
Figure V. 3. Architecture Technique pour la conception d'un SMA. 125
Figure V. 4. Architecture générale du SMA. 127
Figure V. 5. Diagramme de Cas d'utilisation qui décrit les interactions entre l'utilisateur de maintenance et le système. 128
Figure V. 6. Cycle de fonctionnement de base d'un agent. 130
Figure V. 7. Diagramme d'activité des agents. 131
Figure V. 8. Diagramme de séquence des agents. 132
Figure V. 9. Diagramme de séquence de la priorité des tâches. 133
Figure V. 10. Diagramme de séquence de priorité des tâches par code machine. 134
Figure V. 11. Structure Organisationnelle de la gestion de la maintenance. 135
Figure V. 12. Structure organisationnelle de l'évaluation des risques. 135

CHAPITRE VI : APPLICATION ET DISCUSSION DU MODÈLE PROPOSÉ

Figure VI. 1. Implémentation des détecteurs Gaz et Flamme dans le site. 146
Figure VI. 2. Architecture du système étudié. 156
Figure VI. 3. Simulation AnyLogic pour la vérification Camion. 158
Figure VI. 4. Simulation des opérations de chargement. 158
Figure VI. 5. Simulation de la pompe en fonctionnement normal. 159
Figure VI. 6. Simulation AnyLogic des opérations de déchargement. 159
Figure VI. 7. Simulation du compresseur en fonctionnement normal. 160
Figure VI. 8. Statecharts des différents dispositifs contenu dans le poste de chargement/déchargement. 160
Figure VI. 9. Simulation des opérations de chargement par un actionChart. 161
Figure VI. 10. Simulation de fonctionnement de bras. 161
Figure VI. 11. Résultats de la simulation pour l'analyse des risques. 162
Figure VI. 12. Arrêt de système 163
Figure VI. 13. Simulation de la pompe lors d'un arrêt. 163
Figure VI. 14. Simulation de l'Agent Opérateur. 164
Figure VI. 15. Fonctionnement des détecteurs 164
Figure VI. 16. Les KPIs résultant de la simulation. 166
Figure VI. 17. Variations des KPIs de la pompe après défaillance 167
Figure VI. 18. Variations des KPIs de deux équipements (pompe et compresseur). 167
Figure VI. 19. Simulation des défaillances que subit chaque équipement. 168
Figure VI. 20. Simulation de la MTBF des équipements (A). 168
Figure VI. 21. Simulation de la MTBF des équipements (selon B). 168
Figure VI. 22.Simulation de la disponibilité des équipements (A). 169
Figure VI. 23.Simulation de la disponibilité des équipements (B). 169
Figure VI. 24.Simulation de taux de défaillance des équipements (A). 169
Figure VI. 25.Simulation de taux de défaillance des équipements (B). 170

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE I : LA MAINTENANCE DANS L'INDUSTRIE : ENJEUX ET LIMITES

TABLEAU I. 1. NIVEAUX DE MAINTENANCE. 32
TABLEAU I. 2.COMPARAISON ENTRE LES DIFFÉRENTS TYPES DE MAINTENANCE. 36

CHAPITRE III : COMPLEXITÉ D'UN SYSTÈME ET APPROCHE SYSTÉMIQUE

TABLEAU III. 1.COMPARAISON ENTRE UN SYSTÈME COMPLIQUÉ ET UN SYSTÈME COMPLEXE. 62
TABLEAU III. 2. LITTÉRATURES DE LA THÉORIE DES SYSTÈMES COMPLEXES 64
TABLEAU III. 3. LES APPLICATIONS DE LA THÉORIE DES SYSTÈMES COMPLEXES. 64
TABLEAU III. 4. COMPARAISON ENTRE L'APPROCHE ANALYTIQUE ET L'APPROCHE SYSTÉMIQUE. 67
TABLEAU III. 5. LES DIFFÉRENTS TYPES DE MODÈLES. 72

CHAPITRE IV : MODÈLE CONCEPTUEL POUR L'ANALYSE ET L'ÉVALUATION DES RISQUES DES ACTIVITÉS DE MAINTENANCE

TABLEAU IV.1. DÉFINITIONS DES NOTIONS DE DANGER, DOMMAGE, PHÉNOMÈNE DANGEREUX ET ACCIDENT. 85
TABLEAU IV.2. RECAPITULATIF DES MODÈLES D'ANALYSE DES RISQUES AVEC LEURS AVANTAGES ET LEURS LIMITES. 94
TABLEAU IV.3. PROGRAMME SQL POUR LE CALCUL DE LA CRITICITÉ. 100
TABLEAU IV.4. PROGRAMME SQL POUR PRÉSENTER LE TABLEAU DE L'IDENTIFICATION DU SYSTÈME. 102
TABLEAU IV.5. PROGRAMME SQL PRÉSENTANT LA 2ème ÉTAPE DU MODÈLE MOSAR-UML. 102
TABLEAU IV.6. PROGRAMME SQL POUR LA QUANTIFICATION DES RISQUES. 103

CHAPITRE V : SIMULATION PAR LES SYSTÈMES MULTI-AGENTS

TABLEAU V. 1. COMPARAISON ENTRE AGENTS COGNITIFS ET AGENTS RÉACTIFS. 112
TABLEAU V. 2. COMPARAISON ENTRE LES DIFFERENTES PLATEFORMES DE SMA. 121
TABLEAU V. 3. RELATIONS ENTRE LES AGENTS DE LA STRUCTURE ORGANISATIONNELLE POUR LA GESTION DE LA MAINTENANCE. 135
TABLEAU V. 4. RELATIONS ENTRE LES AGENTS DE LA STRUCTURE ORGANISATIONNELLE POUR L'ÉVALUATION DES RISQUES. 135
TABLEAU V. 5. RELATIONS ENTRE LES AGENTS DE LA STRUCTURE ORGANISATIONNELLE GÉNÉRALE. 136

CHAPITRE VI : APPLICATION ET DISCUSSION DU MODÈLE PROPOSÉ

TABLEAU VI. 1. IDENTIFICATION ET MODÉLISATION DU SYSTÈME 147
TABLEAU VI. 2. LES SCÉNARIOS DE DÉFAILLANCE CHOISIS POUR LA MODÉLISATION ET SIMULATION. 148
TABLEAU VI. 3. IDENTIFICATION DES DANGERS ET LES SCÉNARIOS D'ACCIDENTS PRINCIPAUX 150

TABLEAU VI. 4. PARAMÈTRE DE GRAVITÉ. 151
TABLEAU VI. 5. PARAMÈTRE DE PROBABILITÉ. 152
TABLEAU VI. 6. PARAMÈTRE DE DÉTECTABILITÉ. 152
TABLEAU VI. 7. QUANTIFICATION DES RISQUES (3ème ÉTAPE DE MODÈLE MOSAR-UML). 152
TABLEAU VI. 8. QUANTIFICATION DE RISQUES DES DÉTECTEURS 153
TABLEAU VI. 9. MESURE DE SÉCURITÉ. 155
TABLEAU VI. 10. LES INDICATEURS DE PERFORMANCE DE MAINTENANCE. 165

INTRODUCTION GÉNÉRALE

L'évolution et la complexité des systèmes de production ainsi que la concurrence et le besoin de produire beaucoup plus, ont obligé les industriels à structurer et à assurer des « ateliers d'entretien ». Cependant, la production en série et surtout la rentabilité ont poussé les industriels à créer un domaine et une structure plus puissante dans l'entreprise appelée « service maintenance » qui a compensé l'entretien.

La maintenance est devenue une fonction essentielle et une nécessité primordiale dans les entreprises de tous les secteurs (industries primaires et secondaires, agriculture, prestation de service…) au même titre que les fonctions de la production, qualité, sécurité, ressources humaines, etc. (Giraud *et al.*, 2001; Francastel, 2005).

L'automatisation accrue, la complexité et le coût croissant des équipements et par conséquent la nécessité de réduire les temps d'indisponibilité de ces derniers, donne à la maintenance une importance croissante (Grusenmeyer, 2005a; 2005b).

Conformément à la norme (NF EN 13306 : 2001), la maintenance est définie comme étant « *l'ensemble de toutes les actions techniques, administratives et de management durant le cycle de vie d'un bien, destinées à le maintenir ou à le rétablir dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise* ». Les opérations de dépannage, graissage, réparation, amélioration ainsi que les visites constituent des tâches de maintenance qui permettent de conserver le potentiel du matériel pour assurer la continuité et la qualité de la production.

D'après Dekker (1996), la maintenance cherche à accomplir principalement quatre objectifs : assurer le fonctionnement du système (disponibilité, efficacité et qualité du produit), garder les équipements en bon état pour exécuter leurs fonctions prévues, assurer le bien-être humain et enfin assurer la sûreté et sécurité des équipements de production et de tous les capitaux.

Généralement, les interventions de maintenance peuvent être distinguées en trois grandes catégories que sont la maintenance corrective, la maintenance préventive et la maintenance à échelle majeure (Francastel, 2005). Les opérations de maintenance les plus fréquentes sont les opérations de maintenance corrective, effectuées après une défaillance, ou des opérations de maintenance préventive, dans l'intention de réduire la probabilité de défaillance d'un bien ou la dégradation d'un service rendu. Quant aux opérations à échelle majeure, elles sont effectuées dans le but de permettre l'accomplissement par l'équipement de fonctions nouvelles ou supplémentaires, ou mêmes fonctions dans des meilleures conditions.

Auparavant, seuls les employés qui faisaient partie du service de maintenance pouvaient effectuer des interventions de maintenance. Avec l'apparition de la maintenance productive totale TPM (Total Productive Maintenance), l'ensemble du personnel de l'entreprise peut participer à la démarche de maintenance productive (Boucly, 1998; Venkatesh, 2007). En outre, la recherche de diminution des coûts de maintenance ou le besoin d'un personnel spécialisé et qualifié peut aussi entraîner l'apparition d'interventions de maintenance sous-

traitées avec une externalisation du risque vers les sous-traitants (Héry, 2002; Grusenmyer, 2007). Par ailleurs, l'organisation de la maintenance prend aujourd'hui des formes multiples (Barbet *et al.,* 2005): Répartition des tâches entre la maintenance et la production, répartition des tâches en interne/ externe à l'entreprise, ou selon une répartition géographique des équipements à maintenir.

Néanmoins, et bien que la nature essentielle du travail de maintenance soit aujourd'hui plus largement reconnue, les activités de maintenance sont identifiées depuis longtemps comme des situations critiques pour la sécurité des opérateurs (Hale *et al.,* 1998; Batson *et al.,* 1999; Mason, 1990; Ray *et al.,* 2000; Grusenmeyer, 2000; 2002; 2005a; 2005b; Giraud *et al.,* 2001 ; Sanders, 2005; Lind, 2008; Øien *et al.,* 2010; Vinnem, 2012; Vinnem *et al.,* 2012; Gran *et al.,* 2012; Vinnem, 2013; Okoh et Haugen, 2013; Barbet *et al.,* 2013; Okoh et Haugen, 2014). Plusieurs travaux ont montré que plus des trois quarts des accidents liés à la maintenance auraient pu être évités, si des mesures de prévention adaptées avaient été mises en place (Batson *et al.,* 1999; Ray *et al.,* 2000). Une étude a été menée sur l'analyse de 294 accidents, survenus dans l'industrie chimique et qui montre que 40% d'entre eux ont eu lieu pendant des activités de maintenance (Hale *et al.,* 1998). Quant à Okoh et Haugen (2014), ils présentent dans leur travail un ensemble de statistiques récentes sur des accidents majeurs liés à la maintenance dans plusieurs secteurs tels que la chimie, gisement de pétrole, la raffinerie de pétrole, le traitement des déchets, le stockage et la transformation des aliments.

Cette criticité résulte non seulement de la nature des activités concernées, mais aussi du contexte organisationnel dans lequel elles s'insèrent et des interactions entre opérateurs de maintenance et d'exploitation. Ces interactions doivent être perçues à la lumière des interactions complexes entre opérateurs, entre organisations de la maintenance et activités de travail (Dubois, 2003 ; Cuny and Gaillard, 2003). En effet, une situation de maintenance n'est pas une simple tâche réalisée par un opérateur mais une tâche complexe qui fait intervenir plusieurs composantes en interaction (Grusenmyer, 2005).

Pour toutes ces raisons, la maîtrise des risques dans les travaux de maintenance doit être l'un des enjeux majeurs de toute activité industrielle. C'est une opportunité pour enclencher une démarche de sécurité dont la finalité est de préserver la santé et la sécurité des opérateurs de la maintenance. Le développement de cette démarche implique d'explorer la complexité de la maintenance pour éviter un accident potentiel.

Bien que plusieurs modèles, fondés sur l'approche analytique tels que les modèles séquentiels et les modèles organisationnels, d'analyse des risques soient élaborés, malheureusement, ils ne sont pas adaptés, en raison de limitations spécifiques relatives à l'activité de maintenance.

Les modèles séquentiels décrivent un accident sous forme de succession d'un ensemble d'événements reliés entre eux par une relation de cause à effet. Ces modèles séquentiels ne prennent pas en compte les interactions qui existent entre les composants du système et ne traitent pas suffisamment les facteurs humains et organisationnels. L'accident n'est plus considéré comme un enchaînement linéaire de causes allant de l'événement déclencheur comme première cause jusqu'à l'événement dommageable, mais un résultat de nombreuses

interactions dans un système dans lequel plusieurs éléments interagissent entre eux perdant à un instant le contrôle et faisant migrer le système vers un état accidentel (Leveson, 2004).

Les modèles organisationnels présentent seulement un modèle statique d'un système organisationnel. Ils ne permettent pas la formalisation des interactions dynamiques entre les composantes du système.

La vision systémique de l'accident considère l'accident comme un système dans lequel des éléments interagissent entre eux afin de remplir une fonction donnée mais dont le contrôle n'a pas permis d'éviter une migration vers un état accidentel (Rasmussen, 1997; Hardy, 2010). Les modèles d'accidents systémiques naissant de cette évolution reposent sur plusieurs théories qui encadrent leur application. La démarche systémique vise, donc, à organiser les connaissances aux niveaux de la modélisation pour réduire la complexité dans le but de permettre une meilleure compréhension et une analyse plus efficace. Par ailleurs, son objet est d'élaborer un système de représentation qui permet d'appréhender les situations complexes de façon appropriée.

Les modèles systémiques les plus connus sont le modèle STAMP (Systems Theoretic Accident Modelling and Process) développé par Leveson (2004) et le modèle FRAM (Functional Resonance Accident Model) développé par Hollnagel (2004).

Ces modèles sont plutôt utilisés pour l'analyse des risques ou des accidents. Ils ne peuvent pas être utilisés comme des modèles d'aide à la décision. En plus le manque d'une base de données qui englobe toutes les informations sur un accident (allant de définition du système et les causes jusqu'aux mesures de prévention prises) affaiblit souvent les évaluations d'un accident similaire. Par conséquent, les données mal définies empêchent une meilleure connaissance des faits et ne facilitent pas la prise de décision dans un accident similaire.

Dans ce contexte et à partir de ces limites, il est convenu de proposer un nouveau modèle de maîtrise des risques. Ce modèle consiste en un support d'aide à la décision pour la maîtrise des risques liés aux activités de maintenance, qui est capable de prendre en considération la complexité de la tâche de maintenance et son évolution dans le temps. Ce modèle est à base d'agents qui ont pour intérêt d'étudier les différentes interactions entre plusieurs entités et de les simuler afin de résoudre différents problèmes et minimiser les risques pouvant survenir.

1. OBJECTIF GLOBAL

L'objectif de ce travail est de développer une approche multi-agents pour concevoir un système d'aide à la maîtrise des risques dans les travaux de maintenance des systèmes complexes. Fondé sur un simulateur multi-agents, l'objectif est de rendre compte de la complexité d'une tâche de maintenance à des fins d'analyse et de compréhension. Cette complexité réside dans la présence de plusieurs éléments en interaction, ainsi que l'incertitude du comportement général du système étudié en raison de ces interactions. Il s'agit d'orienter les acteurs vers une méthodologie d'aide à la décision innovante pour minimiser les risques pouvant se produire lors des opérations de maintenance.

Ce travail a pour ambition d'apporter des contributions supplémentaires concernant la maîtrise des risques industriels et fait suite aux travaux de (Garbolino *et al.*, 2009; 2010; Bouloiz *et al.*, 2013; 2014) qui portent sur la modélisation de systèmes complexes pour leur analyse des risques. Parallèlement, notre idée de recherche naît aussi d'un problème concret dans un système industriel, particulièrement les chaînes logistiques de GPL, dont les activités de maintenance présentent un ensemble de risques potentiels.

2. CONTEXTE DU TRAVAIL

L'étude des risques industriels et professionnels s'avère aujourd'hui importantes dans les décisions industrielles, notamment lorsqu'elles s'inscrivent dans une démarche d'amélioration continue. La gestion de ces risques constitue un enjeu de plus en plus important dans les sociétés d'aujourd'hui. Elle est devenue un objet de recherche a part entière dans plusieurs disciplines, notamment en gestion, en sciences humaines, en sociologie et en sciences de l'ingénieur (Grusenmyer, 2002). Ces travaux de recherche façonnés par les méthodes de modélisation et d'ingénierie, visent à développer et à formaliser des outils d'aide à la décision qui mettent aux services des décideurs, des moyens pour analyser leurs problèmes et pour pouvoir orienter leurs choix dans la gestion de la sécurité industrielle et la sécurité au travail ou encore pour accroître la capacité de résilience des systèmes industriels face à des événements particulièrement perturbateurs et dommageables.

La modification et la diversification des risques industriels ou ceux associés au milieu du travail, représentent une préoccupation croissante de la société aussi bien au Maroc qu'en Europe et dans le monde. Au Maroc, le coût moyen annuel des accidents du travail est estimé à environ 38 millions d'Euros selon l'Institut National des Conditions de Vie au Travail (2014). Au niveau international, le nombre de décès est de 2.34 millions par an à cause des accidents du travail, soit un décès toutes les 15 secondes selon le Bureau International du Travail (2014).

Notre recherche vise à formaliser et à unifier des savoirs afin de permettre aux individus, aux organisations (et plus particulièrement aux systèmes industriels) de les orienter vers les meilleures décisions, de maîtriser les risques liés à la maintenance, et de faire face à des événements perturbateurs dommageables, et à des aléas liés à la non disponibilité des ressources pour éviter voire éliminer les accidents pouvant survenir lors de la réalisation des tâches de maintenance.

3. MÉTHODOLOGIE

L'approche proposée dans ce travail, fondée sur l'approche systémique, a pour objectif d'analyser les risques liés aux activités de maintenance et de modéliser et simuler ces risques pour évaluer leurs criticités afin de les éviter et garantir la sécurité lors de la réalisation des tâches de maintenance. C'est un modèle d'aide à la décision qui prend en compte la complexité d'une activité de maintenance qui réside dans les interactions entre plusieurs éléments d'ordre humain, technique, organisationnel et environnemental. L'application de cette approche porte sur une chaîne logistique de chargement/déchargement de GPL de site Relais-Vrac de l'entreprise PRIMAGAZ.

La méthodologie adoptée est divisée en quatre grandes phases comme présentée dans la figure i :

- Représentation du système réel: cette phase consiste à identifier le système étudié, son environnement et les différents flux que traversent le système ;
- Modélisation MOSAR-UML: cette phase présente un modèle systémique que nous allons proposer qui combine deux méthodes systémiques: la méthode MOSAR et le langage UML. Ce modèle va nous permettre de modéliser de modéliser les scénarios de risque, et de développer une base de données qui rassemble toutes les informations liées au système. Ces informations seront utilisées par les agents (Gallab *et al.*, 2015b; 2017).
- Simulation à base d'agent: cette phase propose une architecture d'un Système Multi-Agents qui a pour but de maîtriser les risques liés aux activités de maintenance et ce à base des informations collectées.
- Exécution de modèle : cette phase donne lieu à un simulateur à base d'agent qui sera développé dans la plateforme AnyLogic. Dans cette partie nous allons également analyser les résultats obtenus et fournir des recommandations.

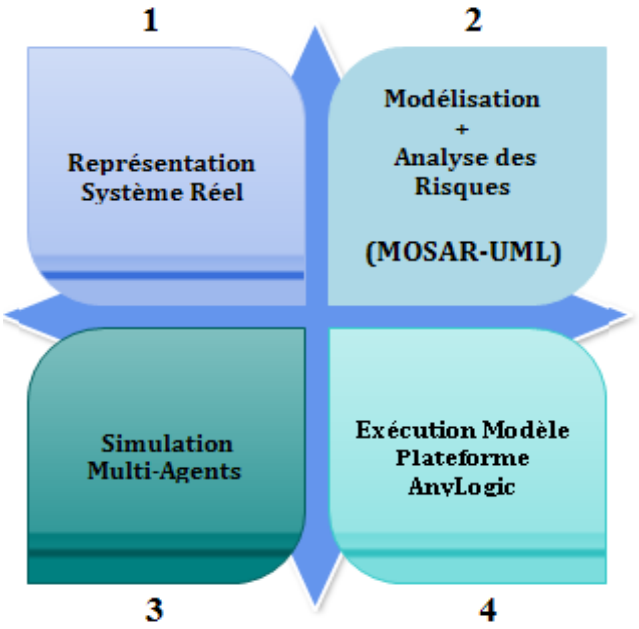


Figure i. 1. La méthodologie adoptée.

Cette méthodologie se compose de 11 étapes et est divisée en deux blocs : la modélisation - simulation et l'analyse des risques du système de maintenance.

La première étape consiste à identifier et modéliser le système réel. Cette première étape permet de représenter la réalité sous forme d'un modèle en définissant les éléments qu'on souhaite intégrer dans le modèle avec les différentes interactions qui lient ces éléments. Ensuite, le comportement du système identifié sera simulé en fonctionnement normal (2ème étape). La 3ème étape consiste à identifier les scénarios de défaillance possible lors des opérations de maintenance dans la chaîne logistique du GPL, qui seront modélisé (étape 4). L'identification et la modélisation des scénarios de défaillance seront faites à l'aide du modèle MOSAR-UML. Après les scénarios de défaillance les plus importants seront simulés

(étape 5). Les étapes 6, 7 et 8 permettent d'identifier les risques et les phénomènes dangereux liés aux scénarios de défaillance choisis, évaluer et quantifier ces risques et présenter des barrières de sécurité qui peuvent être utilisés comme des mesures de prévention ou protection pour éviter ces défaillances. Ces barrières de sécurité seront modélisées dans l'étape 9. Les étapes 6, 7, 8 et 9 seront réalisées à l'aide du modèle MOSAR-UML. La simulation du modèle sera implémentée dans la plateforme AnyLogic.

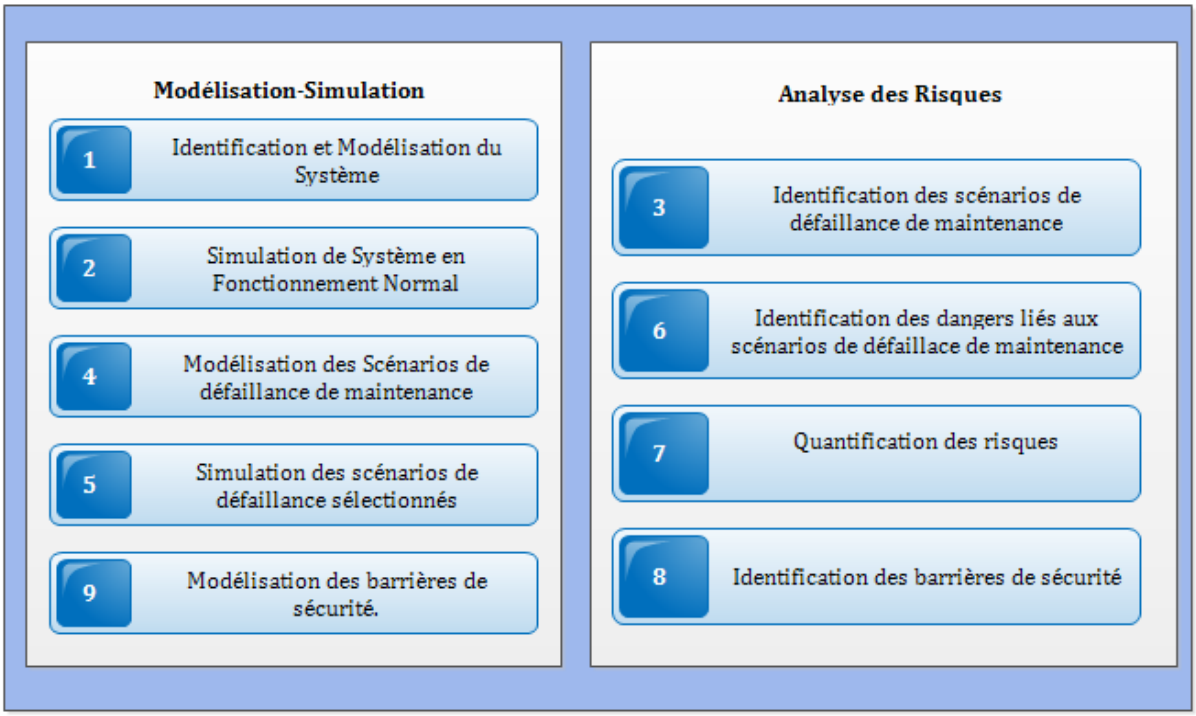


Figure i. 2. Les étapes de modélisation-simulation d'analyse des risques des activités de maintenance.

Le cadre conceptuel de cette méthodologie a été choisi pour plusieurs raisons. Premièrement, parce que la pensée systémique représente une méthode pour comprendre, analyser, appréhender la complexité d'un système, fixer des objectifs et éviter certaines erreurs dans la prise de décision (Le Moigne, 1977 ; Aubert-Lotarski, 2002 ; AFSCET, 2003 ; CERT, 2007). Deuxièmement, cette méthodologie permet de modéliser et de simuler le système face aux risques en intégrant la complexité du système et la notion de temps.

4. STRUCTURE DE LA THÈSE

Cette thèse comporte six chapitres :

- Le **premier chapitre** a pour objectif d'exposer, au travers d'une revue de littérature, des généralités de la maintenance, les types de maintenance, les risques et les accidents liés à ces opérations et les liens entre les activités de maintenance et la sécurité au travail.
- Le **deuxième chapitre** présente le terrain d'expérimentation qui correspond à une chaîne logistique de chargement et déchargement de GPL de site Relais-Vrac de l'entreprise PRIMAGAZ implanté en France. Il introduit également un état de l'art sur les accidents liés aux activités de GPL et les dangers associés.

- Le **troisième chapitre** commence par une définition de la complexité, d'un système complexe et de l'approche systémique avec ses différents concepts et outils, suivie par le choix d'une méthode de modélisation et un cadre conceptuel d'aide à la décision.
  Ce chapitre consiste à montrer que la maintenance étant un système complexe qui réside dans les interactions entre ses différents éléments.
- Le **quatrième chapitre** présente un modèle conceptuel pour l'analyse et l'évaluation des risques des activités de maintenance. Tout d'abord, il fait un état de l'art sur l'analyse des risques industriels, les méthodes d'analyse des risques et leurs limites. Ensuite, il propose un modèle systémique pour l'analyse et l'évaluation des risques qui combine deux méthodes systémiques : MOSAR et le langage UML.
- Le **cinquième chapitre** concerne la simulation par les Systèmes Multi-Agents. Tout d'abord, il définit le cadre général de la simulation et une vue générale sur les systèmes multi-agent. Puis il présente les méthodes de conception et les plateformes de simulation d'un système multi-agent existants. Après il fait une comparaison entre les plateformes d'implémentation pour choisir la plateforme adéquate à notre problématique. Enfin, il propose une architecture Multi-Agents du modèle qui a pour vocation d'anticiper les situations pouvant engendrer des risques en se basant sur l'exploitation d'une base de données crée à l'aide du modèle systémique que nous allons proposer dans le troisième chapitre.
- Le **sixième chapitre** est consacré pour l'application des modèles développés dans le terrain d'étude qu'est la chaîne logistique de GPL. Ce chapitre présente d'abord la modélisation du système étudié pour l'analyse des risques des activités de maintenance, ensuite il présente la simulation du comportement du système sur la plateforme choisie AnyLogic. Finalement, nous discutons les résultats obtenus en faisant une comparaison entre notre travail et les travaux existants et donner son apport dans l'industrie.

Ce document se termine par une conclusion générale qui reprend les principaux atouts de ce travail. Nous présentons également des perspectives et des recommandations pour l'évolution de ces travaux.

5. CONTRIBUTIONS DE RECHERCHE

Cette thèse de doctorat a donné lieu aux travaux suivants :

Contribution	Journal/ Conférence	Situation	Indexation
Towards a model for developing an information system as a decision support to risk assessment	Article Journal	**Publié:** International Journal of Industrial and Systems Engineering, Vol. 25, N°1, 2017, pp.110-129.	Scopus
Simulation of Failure Scenarios related to Maintenance Activities	Article Journal	**Publié:** International Journal of Applied Engineering Research, Vol: 11, N°24, 2016, pp. 11935-11949.	Scopus

Towards a Simulation Model to Ensure the Availability of Machines in Maintenance Activities	Article Journal	**Publié:** International Journal of Computer, Electrical, Control and Information Engineering, Vol. 10, N°7, 2016, pp. 1213- 1217.	ISI Google Scholar
A Multi-Agent Approach for Modeling and Simulation of Maintenance Resources Optimization	Article Journal	**Encours de révision**	Scopus Thomson Reuters
Occupational hazard analysis in maintenance activities: Critical study and Perspectives	Article Journal	**Under review**	Scopus
Risk Analysis of Maintenance Activities in a LPG supply chain with a Multi-Agent Approach	Article Journal	**Publié:** Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Volume 47, May 2017, Pages 41-56.	Scopus
Conformity checking of LPG transportation Trucks by Modelling and Simulation	Article Workshop	**Présenté et Publié :** MATEC Web Conf., Vol 105, N°00004 (2017). International Workshop on Transportation and Supply Chain Engineering IWTSCE16. 29-30 Novembre 2016, UIR-Rabat, Maroc.	Scopus Thomson Reuters
Model for Developing a Database for Risk Analysis	Article Conférence	**Publié:** Industrial Engineering and Systems Management (IESM), 2015 International Conference on, Seville, 2015, pp. 833-841. DOI: 10.1109/ IESM.2015.7380253.	Scopus
Decision Support for Occupational Risk Overcome in Maintenance Activities	Article Conférence	**Présenté et Publié :** Science and Information Conference (SAI), pp.426-434, London-UK, 28-30 Juillet 2015. DOI: 10.1109/ SAI.2015.7237177.	Scopus
Analyse des risques dans les activités de maintenance : Etude critique de l'existant et Perspectives	Congrès	**Présentation Orale :** Congrès HES15- 4ème Edition du congrès International EHSP-NRCS : Sécurité Humaine et Environnementale à l'Ère des Risques Globaux. 25-27 Novembre 2015, Agadir, Maroc.	-
Risk Assessment in LPG Loading Operations by Simulation	Conférence	**Présenté: Best Track Paper Award** International Conference on Industrial Engineering and Operations Management IEOM17, 11-13 Avril 2017, Rabat-Morocco.	Scopus

CHAPITRE I
LA MAINTENANCE DANS L'INDUSTRIE : ENJEUX ET LIMITES EN MAÎTRISE DES RISQUES

INTRODUCTION 28
1. GÉNÉRALITÉS 28
1.1. Concepts et définitions 28
1.2. Historique et Evolution 29
1.2.1. 1ère génération 29
1.2.2. 2ème génération 30
1.2.3. 3ème génération 30
1.2.4. Génération récente 30
1.3. Objectifs de la maintenance 31
1.4. Niveaux de maintenance 32
1.5. Formes d'organisation de la maintenance 33
2. TYPES DE MAINTENANCE 33
2.1. La maintenance corrective 33
2.1.1. Maintenance Palliative 33
2.1.2. Maintenance Curative 34
2.2. La maintenance préventive 34
2.2.1. Maintenance Systématique 34
2.2.2. Maintenance Conditionnelle 35
2.2.3. Maintenance Prévisionnelle 35
2.3. La maintenance à échelle majeure 35
2.3.1. Maintenance Améliorative 35
2.3.2. Travaux Neufs 35
3. LES RISQUES ET LES ACCIDENTS DANS LES ACTIVITÉS DE LA MAINTENANCE 37
3.1. Les accidents liés aux activités de maintenance 37
3.2. La maintenance comme une activité dangereuse 38
3.3. Les dangers liés aux activités de maintenance 40
4. CONCLUSION 41
BIBLIOGRAPHIE 41

INTRODUCTION

Depuis une vingtaine d'année, la maintenance est devenue un ensemble d'activités effectuées et gérées par le service maintenance qui veille au respect des plans de production et n'est plus considérée comme un mal nécessaire. En effet, la maintenance était longtemps vue comme une fonction sous-estimée, méprisée au sein d'une entreprise et jugée très coûteuse (Lapointe and St-Marseille, 1997). Actuellement, la maintenance prend croissance et se révèle une des fonctions clés de l'entreprise. Elle est considérée comme un véritable enjeu compétitif permettant l'assurance des performances de disponibilité des matériels, de sécurité et de qualité (Nguyen Thi, 2012).

L'objectif de ce chapitre est de présenter les concepts élémentaires de la maintenance, son histoire et son évolution dans le temps, et de présenter les accidents liés aux activités de maintenance afin de répondre aux problématiques générales énoncées.

1. GÉNÉRALITÉS

1.1. Concepts et définitions

La maintenance apparaît comme une fonction primordiale au sein de l'entreprise de tous les secteurs (industries primaires et secondaires, agriculture, prestation de service, etc.) au même titre que les fonctions de la production, qualité, sécurité, ressources humaines, etc. (Giraud *et al.*, 2001; Francastel, 2005).

La norme (NF-EN 13306, 2001) définit la maintenance comme étant *« Un ensemble des actions techniques, administratives et de management durant le cycle de vie d'un bien, qui permettent de le maintenir ou de le rétablir dans un état spécifié ou en mesure d'assurer un service déterminé ou une fonction requise »*.

La maintenance consiste à maintenir en bon fonctionnement les équipements, installations et les infrastructures présents dans l'entreprise afin de réduire au minimum les arrêts de production. Dans une entreprise, maintenir, c'est effectuer des opérations (dépannage, réparation, graissage, contrôle, etc.) qui permettent de conserver le potentiel du matériel pour assurer la production avec efficacité et qualité.

L'objectif premier de la production est de fabriquer plus, à vive allure et avec une qualité optimisée, alors que la maintenance a pour vocation initiale de garantir la disponibilité maximale de l'outil de production, ce qui nécessite obligatoirement son arrêt pendant un temps donné pour y parvenir.

Pour rallier ces deux objectifs sur un objectif commun, qui tourne autour de la compétitivité de l'entreprise dans le marché mondial, il devient impératif de positionner la fonction maintenance à la place qui lui revient, soit l'une des grandes fonctions de productivité de l'entreprise.

Afin de réussir à accomplir sa mission, la gestion de la maintenance consiste à établir comment, pourquoi, par qui, où, à quelle fréquence et à quel prix la maintenance doit être effectuée. Une bonne gestion de la maintenance a besoin d'un outil permettant à l'entreprise d'arriver à ses performances réelles, d'établir avec une certaine précision les coûts réels reliés à la maintenance et de trouver des pistes d'amélioration de ses procédés dans le but d'atteindre ses objectifs stratégiques.

1.2. Historique et Evolution

Au début, la maintenance n'était plus qu'une partie inévitable de la production (Pintelon and Parodi-Herz, 2008). Les réparations et les remplacements ont été abordés lors de la nécessité et non pas pour l'optimisation. Plus tard, il a été conçu que la maintenance est une question technique qui n'inclut pas seulement l'optimisation des solutions techniques, mais prend aussi en considération l'organisation des travaux de la maintenance (Pintelon and Parodi-Herz, 2008). Plus loin, la maintenance devient une fonction entière, au lieu d'une sous-fonction de production. Aujourd'hui, la gestion de la maintenance est devenue une fonction complexe, englobant des compétences techniques et managériales, qui nécessite une certaine souplesse pour faire face à l'augmentation de la complexité des processus de fabrication et la variété des produits, à la prise de conscience de l'impact de la maintenance sur l'environnement et à la sécurité du personnel, à la rentabilité de l'entreprise et à la qualité des produits.

La maintenance a donc évolué dans le temps. Cette évolution peut être classée comme première, deuxième, troisième et récente génération par apport aux concepts de la maintenance avec ses points de transition respectifs (Arunraj and Maiti, 2007; Pintelon and Parodi-Herz, 2008). Cette partie présente un aperçu sur l'évolution de la maintenance selon ces générations (figure I.1).

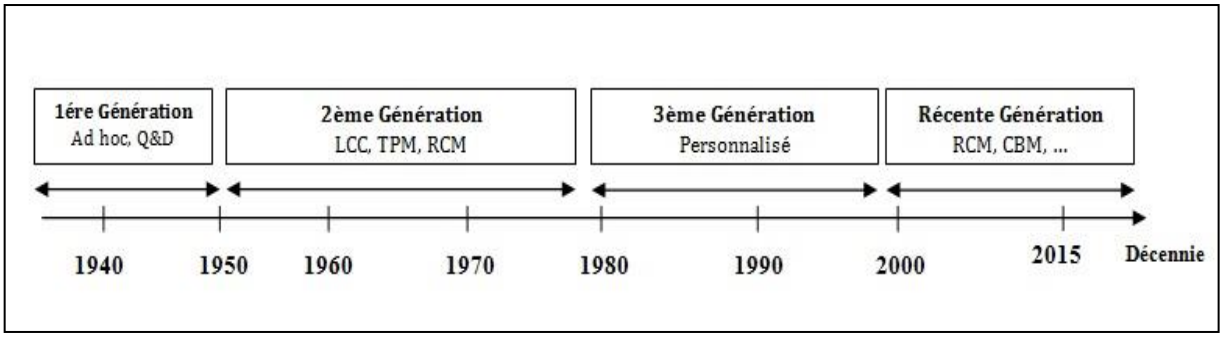


Figure I. 3. Evolution de la maintenance dans le temps.

1.2.1. 1ère génération

La première génération appartient généralement au temps avant la seconde guerre mondiale. Les industries n'étaient pas encore fortement mécanisées. Les équipements étaient simples et faciles à manier ce qui les rendait fiables et faciles à réparer. Dans cette génération, une seule politique de maintenance ou même type d'action a été appliqué à un certain équipement. Les stratégies de maintenance consistaient essentiellement à fonctionner les systèmes jusqu'à la défaillance pour ensuite les réparer ou les remplacer.

Cette génération met en évidence deux concepts de maintenance : le concept de *Ad hoc* qui met en œuvre plusieurs politiques d'entretien (tels que failure based maintenance, use based maintenance), et le concept de Quick and Dirty (Q&D) qui permet de sélectionner les politiques de maintenance adéquates comme le seul « oui » ou « non » des réponses peuvent être données à une série de questions structurées, mais simples. Dans (Wang, 2002), l'auteur donne plus de détails sur tous ces concepts.

1.2.2. 2ème génération

La deuxième génération appartient à la période de temps entre la seconde guerre et la fin des années 1970. Les industries deviennent plus complexes avec une grande dépendance à l'égard des machines. Le coût de la maintenance est devenu plus élevé que les autres coûts d'exploitation relative. Cette génération fournit un réservoir de connaissances pour les praticiens et les chercheurs de maintenance (Pintelon and Parodi-Herz, 2008). Cette génération met en lumière plusieurs concepts de maintenance telles que :

- **Life Cycle Cost (LCC):** se compose de détail sur la ventilation des coûts, sur la durée de vie de l'équipement aidant à planifier la logistique de maintenance (Pintelon and Parodi-Herz, 2008). Cette grandeur est utilisée dans une démarche décisionnelle permettant l'optimisation du coût global d'un système durant son cycle de vie. Toutefois, la difficulté principale de cette approche est l'estimation des différents coûts intervenant durant le cycle de vie d'un équipement.
- **Productive Totale Maintenance (TPM):** implique une participation totale, à tous les niveaux de l'organisation, et donne une vue globale sur la maintenance et la production. Cette approche s'inscrit dans une stratégie du zéro défaut, zéro délai, zéro stock et zéro panne. Elle cherche à améliorer la disponibilité des équipements en mettant l'accent sur l'organisation des ressources productives.
- **Fiabilité Centrée Maintenance (RCM):** est une méthode pour établir un programme d'entretien préventif, afin d'améliorer progressivement le niveau de disponibilité de l'équipement critique. RCM est essentiellement basée sur une connaissance précise des systèmes fonctionnels et dysfonctionnels.

1.2.3. 3ème génération

Les concepts de maintenance sur mesure constituent la "troisième génération" de l'évolution de la maintenance (Pintelon and Parodi-Herz, 2008). Comme expliqué par ces auteurs, les concepts de cette génération sont les résultats de la mise au point et la mise à jour de vieux concepts et impliquent des techniques utiles et des idées appliquées dans d'autres concepts de maintenance. La principale force de concepts de maintenance personnalisés exploite les points forts de l'entreprise, et compte tenu du contexte de l'entreprise spécifique.

1.2.4. Génération récente

En 1990, les méthodes d'inspection et de la maintenance fondées sur le risque ont commencé à émerger et à obtenir de la popularité au-delà de 2000 (Arunraj and Maiti, 2007).

Cette génération est fortement caractérisée par la création de l'inspection et de la maintenance basée sur les risques, c'est le cas de la RCM (Reliability Centred Maintenance) et le CBM (Condition Based-Maintenance). Jusqu'à 2000, la maintenance et la sécurité ont été considérées comme des activités distinctes et indépendantes (Raouf, 2004). L'objectif global du processus de maintenance est d'augmenter la rentabilité de l'opération et d'optimiser le coût total du cycle de vie sans compromettre la sécurité ou les questions environnementales. L'inspection et la planification de la maintenance basées sur l'analyse des risques minimisent la probabilité de défaillance du système et de ses conséquences. Ils aident la direction à prendre les bonnes décisions en matière d'investissement dans la maintenance et des domaines connexes.

1.3. Objectifs de la maintenance

La maintenance industrielle a pour vocation d'assurer un ensemble d'objectifs présentés dans la Fig.I.2:

- Assurer le fonctionnement du système : dans le but d'atteindre les objectifs de la production en garantissant la disponibilité et le bon fonctionnement des machines ;
- Garder les équipements en bon état pour exécuter leurs fonctions prévues : pour augmenter leurs durées d'usage ;
- Assurer le bien-être humain : en dépit des aspects techniques et économiques ;
- Assurer la sûreté et la sécurité des équipements de production et de tous les capitaux : en assurant un niveau de risque inférieur à une limite appropriée.

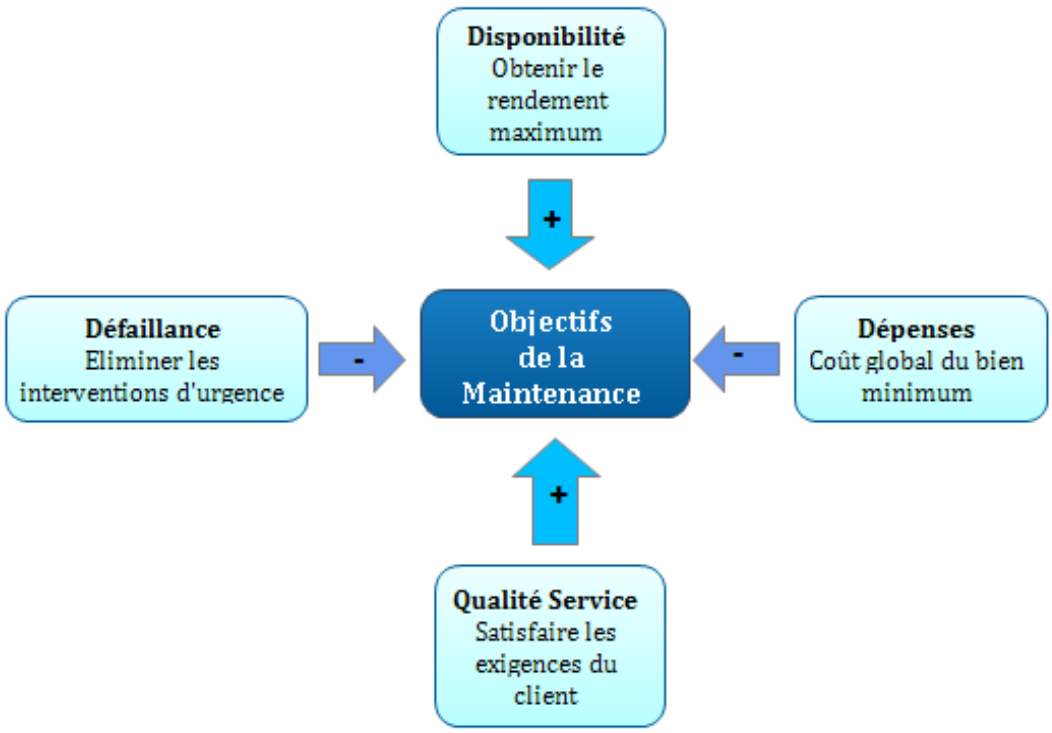


Figure I. 4. Les objectifs de la maintenance.

1.4. Niveaux de maintenance

Pour mettre en œuvre une organisation efficace de la maintenance et prendre des décisions comme gestionnaire dans des domaines tels que la sous-traitance, le recrutement de personnel approprié…, la norme AFNOR X 60-000 propose un classement des actions de maintenance en cinq niveaux selon la complexité des travaux :

- **Niveau 1 :** Correspond au réglage simple prévu par le constructeur au moyen d'organes accessibles sans aucun démontage d'équipement, ou échange d'éléments accessibles en toute sécurité. Il correspond aussi aux échanges d'éléments consommables accessibles en toute sécurité, tels que voyants, huiles, filtres. Le type d'intervention est effectué par l'exploitant sans outillage et à l'aide des instructions d'utilisation.

- **Niveau 2 :** correspond aux dépannages par échange standard d'éléments prévus à cet effet, ou d'opérations mineurs de maintenance préventive. Le type d'intervention est effectué par un technicien habilité de qualification moyenne.

- **Niveau 3 :** consiste à l'identification et diagnostic de pannes, réparation par échange de composants fonctionnels, réparations mécaniques mineurs, réglage réétalonnage des mesureurs.

- **Niveau 4 :** correspond aux travaux importants de maintenance corrective ou préventive : démontage, réparation, remontage, réglage d'un système, révision générale d'un équipement (ex. compresseur), remplacement d'un coffret d'équipement électrique.

- **Niveau 5 :** correspond aux travaux de rénovation, de reconstruction, ou réparations importantes confiées à un atelier central : révision générale d'un équipement (chaufferie d'une usine), réparation d'un équipement suite à un accident grave (ex. dégât des eaux).

TABLEAU I. 1. NIVEAUX DE MAINTENANCE.

Niveau TPM	Niveau AFNOR	Types de travaux	Personnel concerné	Moyens
Niveau I	1	Réglage simple d'équipements accessibles sans démontage. Echange d'éléments.	Opérateur système sur place.	Outillage léger défini dans la notice d'utilisation.
	2	Réparation ou dépannage par échange standard. Opérations simples de prévention.	Technicien habilité sur place.	Outillage standard et pièces de rechange situés à proximité.
Niveau II	3	Identification des origines de pannes. Echange de composants fonctionnels.	Technicien spécialisé sur place ou en atelier de maintenance.	Outillages et appareils de mesure.
	4	Travaux importants de maintenance préventive et corrective. Révision.	Equipe encadrée par un technicien spécialisé, en atelier central.	Outillage général et spécialisé.
Niveau III	5	Travaux de rénovation de reconstruction et de réparations importantes, confiés aux sous-traitants.	Equipe polyvalente complète, en atelier central.	Moyens importants proches de ceux du constructeur.

1.5. Formes d'organisation de la maintenance

L'organisation de la maintenance prend aujourd'hui des formes multiples (Barbet *et al.*, 2005):

- ✓ Répartition des tâches entre la maintenance et la production :
  - **Maintenance spécialisée :** Effectuée par les seuls opérateurs de maintenance (opérateurs spécialisés ou polyvalents) ;
  - **Maintenance partagée :** réalisée à la fois par les opérateurs de maintenance et par les opérateurs de production ;
  - **Maintenance intégrée :** réalisée essentiellement par les opérateurs de production.

- ✓ Répartition des tâches en interne / externe à l'entreprise :
  - **Maintenance sous-traitée :** effectuée par les opérateurs d'entreprises extérieures ;
  - **Maintenance interne :** effectuée par les opérateurs de l'entreprise.

- ✓ Répartition géographique des équipements à maintenir :
  - **Maintenance centralisée:** les opérateurs interviennent sur l'ensemble des équipements ;
  - **Maintenance géographique:** les opérateurs n'interviennent que sur des secteurs délimités.

2. TYPES DE MAINTENANCE

Selon Francastel (2005), les interventions de maintenance peuvent être distinguées en trois grandes catégories que sont la maintenance corrective, la maintenance préventive et la maintenance à échelle majeure.

2.1. La maintenance corrective

Selon la norme NF-EN 13306, la maintenance corrective est la maintenance exécutée après défaillance et destinée à remettre un bien dans un état dans lequel il peut accomplir une fonction requise (Sheu and Krajewski, 1994 ; Eisenmann, 1997).

Deux types de maintenance corrective sont distingués : la maintenance palliative et la maintenance curative.

2.1.1. Maintenance Palliative

La maintenance corrective palliative est une action destinée à permettre à un bien d'accomplir provisoirement toute ou une partie d'une fonction requise. Lorsqu'une pièce, un outillage et/ou une compétence ne sont pas disponibles et que l'arrêt de la production n'est pas acceptable, on peut chercher à se débrouiller avec d'autres moyens.

Donc la maintenance palliative (appelée couramment « dépannage ») est une intervention rapide pour pallier au plus urgent en attendant de trouver une solution ou une correction définitive plus rassurante.

2.1.2. Maintenance Curative

La maintenance corrective curative permet de rétablir un matériel ou une entité dans un état spécifié ou de lui permettre d'accomplir une fonction requise. Elle consiste à supprimer durablement les défaillances.

La notion de « correction » après défaillance contient la notion « d'amélioration ». En effet, après détection d'une défaillance fortuite, en entretien traditionnel, on effectue un dépannage ou une réparation rétablissant la fonction perdue, par la réalisation :

- D'une analyse des causes de défaillance ;
- D'une remise en état (dépannage-réparation) ;
- D'une amélioration éventuelle « correction » visant à éviter la réapparition de la panne, ou à minimiser ses effets sur le système ;
- D'une mise en mémoire de l'intervention permettant une exploitation ultérieure.

2.2. La maintenance préventive

Selon la norme EN 133306: Avril 2001, la maintenance préventive est la maintenance exécutée à des intervalles prédéterminés ou selon des critères prescrits et destinées à réduire la probabilité de défaillance ou la dégradation du fonctionnement d'un bien. Il s'agit d'une intervention de maintenance prévue et programmée avant la date probable d'apparition d'une défaillance.

L'objectif de ce type de maintenance est de:

- Augmenter la fiabilité d'un équipement, donc réduire les défaillances : réduction des coûts de défaillances, amélioration de la disponibilité ;
- Augmenter la durée de vie efficace d'un équipement ;
- Améliorer l'ordonnancement de travaux, donc les relations avec la production ;
- Réduire et régulariser la charge de travail ;
- Faciliter la gestion des stocks (consommations prévues) ;
- Assurer la sécurité (moins d'improvisations dangereuses).

La maintenance préventive peut se traduire par trois types : Maintenance Systématique, Maintenance Conditionnelle, et Maintenance Prévisionnelle.

2.2.1. Maintenance Systématique

Selon la norme EN 133306 : Avril 2001, il s'agit de la maintenance préventive exécutée à des intervalles de temps préétablis ou selon un nombre défini d'unités d'usage mais sans contrôle préalable de l'état du bien.

2.2.2. Maintenance Conditionnelle

Selon la norme EN 133306: Avril 2001, ce type de maintenance est basé sur une surveillance du fonctionnement du bien et/ ou des paramètres significatifs de ce fonctionnement intégrant les actions qui en découlent. La surveillance du fonctionnement et des paramètres peut être exécutée selon un calendrier, ou à la demande, ou de façon continue.

2.2.3. Maintenance Prévisionnelle

Selon la norme EN 133306: Avril 2001, la maintenance conditionnelle prévisionnelle est exécutée en suivant les prévisions extrapolées de l'analyse et de l'évaluation de paramètres significatifs de la dégradation du bien.

2.3. La maintenance à échelle majeure

La maintenance à échelle majeure est une maintenance effectuée dans le but de permettre l'accomplissement par le bien des fonctions nouvelles ou supplémentaires, ou des mêmes fonctions dans de meilleures conditions. Ce type de maintenance est fréquemment effectué lors d'arrêts programmés du fonctionnement des équipements. Elle est divisée en deux types : Maintenance Améliorative et Travaux neufs (Barbet *et al.*, 2013).

2.3.1. Maintenance Améliorative

La maintenance Améliorative est un ensemble des activités et actions visant à améliorer la fiabilité et la maintenabilité du système ou à modifier un équipement ou un sous-ensemble de façon à augmenter sa sécurité, sa fiabilité, sa maintenabilité et sa disponibilité (Monchy, 1996).

2.3.2. Travaux Neufs

Les travaux neufs sont les travaux de construction, d'installation, de mise en service après installation de nouveaux biens ou équipements.

Selon (Monchy, 1996), environ 70% des services de maintenance sont responsables des travaux neufs.

Le schéma ci-dessous (figure I.3) résume les types de maintenance :

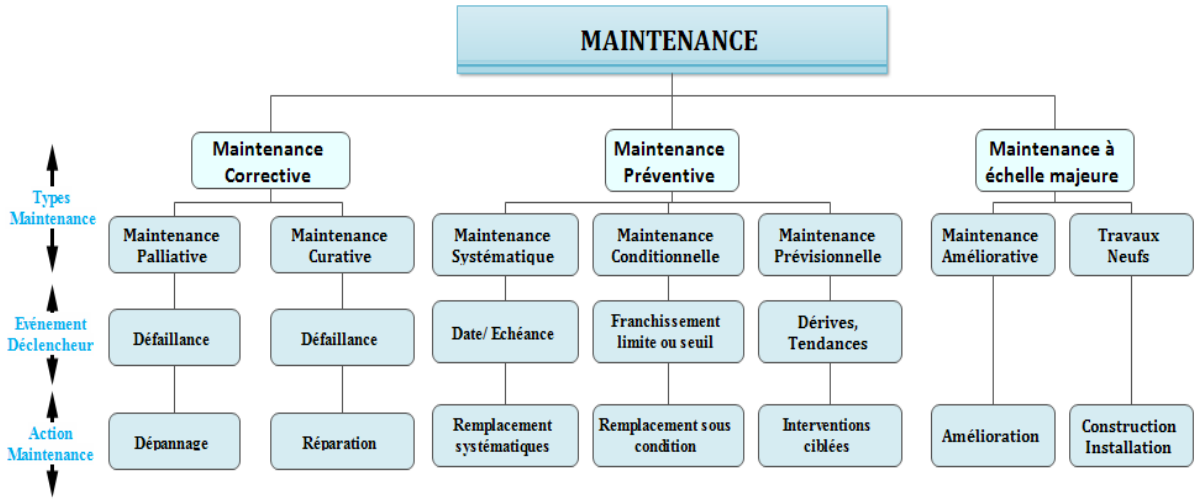
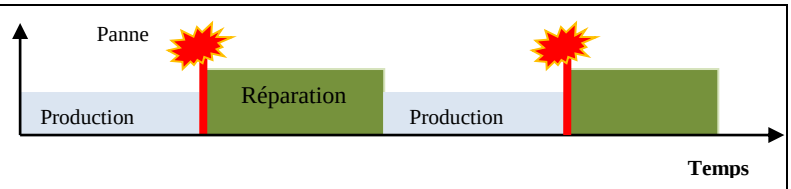
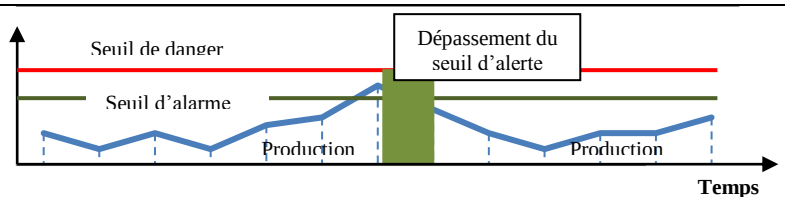
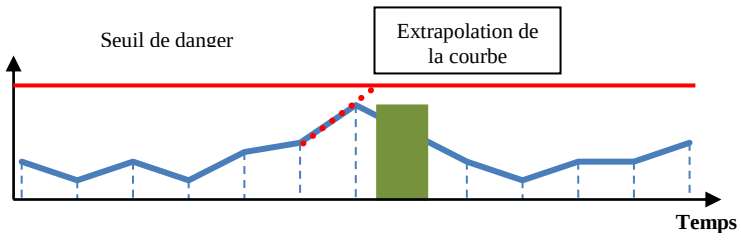


Figure I.5. Types de Maintenance.

Dans le tableau suivant, nous présentons une comparaison entre les différents types de maintenance :

TABLEAU I. 2. COMPARAISON ENTRE LES DIFFÉRENTS TYPES DE MAINTENANCE.

Maintenance Corrective Remise en état de fonctionnement après une défaillance.	
Maintenance Préventive Systématique Interventions à intervalles réguliers	
Maintenance Préventive Conditionnelle Mesure à intervalle réguliers : détection du problème avant la défaillance prévue.	
Maintenance Préventive Prévisionnelle Mesure à intervalle réguliers, suivi de l'évolution de la machine, détection du problème avant la défaillance prévue, planification possible de l'intervention.	

3. LES RISQUES ET LES ACCIDENTS DANS LES ACTIVITÉS DE MAINTENANCE

3.1. Les accidents liés aux activités de maintenance

Alors que la maintenance est un point clé permettant d'assurer la sécurité des systèmes complexes, elle peut également être à l'origine de défaillances et d'accidents sérieux (Hale *et al.*, 1998; Grusenmyer, 2000; Wallace et al, 2003; Sanders, 2005; Lind, 2008; Øien et al, 2010; Vinnem, 2012; Vinnem *et al.*, 2012; Gran *et al.*, 2012; Vinnem, 2013; Okoh et Haugen, 2013; Barbet et al, 2013; Okoh et Haugen, 2014). Parmi les accidents les plus connus : l'explosion de raffinerie de ville du Texas (23 Mars 2005), l'explosion de plastiques de Stockline (11 Mai 2004), l'explosion chimique d'usine de DSM (1 Avril 2003), l'explosion de raffinerie de Sodegaura (16 Octobre 1992), l'explosion de 66 Phillips (23 Octobre 1989), l'explosion d'alpha de Piper (6 Juillet 1988), la fuite de gaz de Bhopal (décembre, 1984) et l'explosion de gaz de Flixborough (1 Juin 1974).

En effet, les activités de maintenance se révèlent très accidentogènes. Selon l'Agence Européenne pour la santé et la sécurité au travail, il apparait que 15 à 20% (selon le pays : 20% en Belgique, 18-19% en Finlande, 14-17% en Espagne, et 10-14% en Italie) de tous les accidents, et 10 à 15% de tous les accidents mortels étaient liés à la maintenance (EU-OSHA, 2010; Okoh *et al.*, 2013).

Des études menées par OSHA (Occupational Safety and Health Administration) sur les accidents du travail survenus en 1989 aux Etats-Unis, ont estimé que 122 accidents mortels, 2840 journées de travail perdues du fait de blessures, et 31900 accidents n'ayant pas donné lieu à des arrêts de travail, étaient liés à la maintenance (Batson *et al.*, 1999 ; Ray *et al.*, 2000).

Une autre étude réalisée par (Pichot, 2006) a révélé que les travailleurs de maintenance sont plus vulnérables aux maladies professionnelles que les autres travailleurs. En outre, l'enquête menée par (Vautrin *et al.*, 1992) en France, ainsi que celle réalisée par Jarvinen et Karwowski (1993) aux Etats-Unis, sur les accidents survenant sur les systèmes automatisés ou robotisés, indiquent que, dans 22% des cas, les victimes de ces accidents sont le personnel de réparation, ou de maintenance.

Une étude faite par l'AFIM 2004 (Association Française des Ingénieurs et techniciens de Maintenance), sur les accidents et maladies professionnelles de plusieurs entreprises prestataires de service en maintenance, dans la région Provence Alpes Côte d'Azur, souligne que les métiers de la maintenance industrielle sont plus exposés par apport à d'autres métiers. D'ailleurs, il est noté que les métiers de la maintenance présentent une occurrence de maladies professionnelles de 8 à 10 fois plus élevée que la moyenne et une durée d'incapacité temporaire liée aux accidents de 53 jours, soit 12 jours de plus que la moyenne nationale.

Au Maroc, 9600 accidents du travail ont été signalés en 2006. Cette étude, réalisée à partir des copies de rapports d'accidents reçus par les délégations préfectorales du ministère de

l'Emploi, concernant 22 industries, y compris la fabrication, la construction, la mécanique, la chimie et l'électricité. Dans ces secteurs, les accidents du travail sont généralement dus à des opérations de maintenance et causant parfois des blessures graves.

Okoh et Haugen (2014) présentent un ensemble de statistiques récentes sur des accidents majeurs liés à la maintenance dans plusieurs secteurs tels que la chimie, gisement de pétrole, la raffinerie de pétrole, le traitement des déchets, le stockage et la transformation des aliments.

Ces accidents peuvent être liés à des défauts de maintenance, comme insuffisance, inappropriée, manque ou retard de maintenance. L'équipement ou l'installation peut devenir dangereux et présente un risques pour le personnel de maintenance et de production si la maintenance n'est pas réalisé suffisamment et correctement (Smith et Harris, 1992; Male, 1998; Hale *et al.*, 1998; Wallace *et al.*, 2003; Sanders, 2005; Øien *et al.*, 2010; Vinnem *et al.*, 2012; Gran *et al.*, 2012; Vinnem, 2013).

3.2. La maintenance comme une activité dangereuse

Dans plusieurs politiques de maintenance développés dans les générations précédentes (section 1.2), la maintenance et la sécurité ont été traitées comme des activités distinctes et indépendantes (Raouf, 2004). Alors, l'intérêt de la maintenance en général est d'assurer à la fois la disponibilité et la fiabilité des équipements de production et d'optimiser le coût total du cycle de vie sans compromettre la sécurité ou les questions environnementales (Arunraj *et al.*, 2007). Hale *et al.*, (1998) a expliqué que le but principal de la maintenance est d'éviter une défaillance importante dans le fonctionnement d'usine, ce qui peut menacer non seulement la production, mais aussi la sécurité des opérateurs.

Les risques liés aux opérations de maintenance peuvent être classés selon trois catégories (Pintelon and Muchiri 2009) :

a. Dangers apparus lors de la maintenance;
b. Dangers causés par une mauvaise maintenance;
c. Dangers causés par un manque de maintenance.

Dans notre travail, nous nous intéressons au type de danger "a" qui se produit lors de déroulement de la maintenance. Cela soulève une question de l'analyse des risques professionnels et de la sécurité des tâches de maintenance.

La notion de risque dans la maintenance basée sur les risques (RBM) est liée au risque d'échec et de son impact sur la disponibilité des équipements (Khan *et al.*, 2003). Les approches de la RBM ne sont pas confrontées à un risque en tant que produit de la criticité des tâches de maintenance. Cette criticité peut exposer les opérateurs à des risques professionnels graves. En effet, bien que la nature essentielle du travail de maintenance est désormais plus largement reconnu, les activités de maintenance sont identifiées comme des situations critiques pour la sécurité des opérateurs (Mason, 1990; Grusenmyer, 2000; Ray *et al.*, 2000; Giraud *et al.*, 2001; Carrillo-Castrillo *et al.*, 2015). Dans ces situations, le risque

peut prendre deux formes : accident du travail ou maladie professionnelle. Un accident du travail est un événement soudain menant à un accident du travail physique (à savoir la chute d'une personne, le contact avec le feu, collision). Les résultats des maladies professionnelles dans une exposition plus prolongée à des phénomènes dangereux (tels que le cancer, des problèmes d'audition, et les troubles musculo-squelettiques).

Néanmoins, la criticité des activités de maintenance découle non seulement de la nature des tâches de maintenance, mais aussi du contexte organisationnel et de l'environnement dans lequel ils opèrent, et les interactions entre la maintenance et l'exploitation.

Le contexte organisationnel pour la sécurité dans la maintenance se réfère à des conditions qui influent sur les possibilités d'un système social-technique, une organisation ou un individu pour contrôler les risques liés à l'environnement de travail et les risques d'accidents potentiels (Rosness *et al.,* 2012). Ces conditions sont importantes pour la sécurité organisationnelle et l'environnement de travail. Cet environnement est composé d'éléments humains, techniques et organisationnels, qui sont organisées ensemble pour réaliser une intervention spécifique. L'importance de ces conditions environnementales (liées à la sécurité) a été démontrée dans plusieurs enquêtes sur les accidents (Vaughan, 1996; Rasmussen, 1997; Kletz, 2001; Kletz, 2003; Starbuck et Farjoun, 2005; Leveson *et al.,* 2005; Baker, 2007; Hopkins, 2008).

Le facteur humain est un élément très important dans ce contexte organisationnel. Traditionnellement, le facteur humain se réfère à l'interaction des individus les uns avec les autres, avec les installations et machines, et avec les systèmes d'organisation et de gestion. Cette interaction influe sur le comportement au travail.

Dans Gallo (1999), le comportement est défini comme « *une réalité appréhendée comme unités d'observation, actes, dans lequel la fréquence et les séquences sont susceptibles de changer; elle se traduit par une action à l'image de la situation telle qu'elle est développée, avec ses propres outils: le comportement exprime une forme de représentation et la construction d'un monde particulier* ». Selon (Simard *et al.,* 1997), il existe deux types de comportement de sécurité. Le premier correspond à la mise en garde, qui consiste par exemple à respecter et à mettre en œuvre plusieurs règles de sécurité, de porter un équipement de protection, etc. Le second type est une initiative sécuritaire ou une initiative de comportement pour la sécurité (Simard *et al.,* 1997). Ce second type de comportement consiste à faire des suggestions en vue d'améliorer la sécurité ou à prendre des initiatives pour éviter une situation de risque ou encore pour proposer des mesures correctives lorsque l'équipement est défectueux.

Selon Wagenaar *et al.,* (1994), le comportement humain constitue un facteur important dans la sécurité. Dans le domaine de l'analyse de la fiabilité humaine, de nombreuses études ont été réalisées pour définir les erreurs humaines et d'évaluer leurs probabilités (Reason, 1997; Blackman *et al.,* 1998; Hollnagel, 2000).

L'erreur humaine peut être définie comme « *Un échec des actions prévues pour atteindre les objectifs visés - sans l'intervention d'un événement imprévisible* » (Reason, 1997). Dans les

opérations de maintenance, les possibilités d'erreur humaine est vaste, et se produit pour divers facteurs liés au contexte organisationnel de la maintenance: les erreurs dues à une mauvaise pertinence des procédures, des erreurs dues au manque de normalisation des données (qui entraîne un manque d'information sur les dangers et les accidents), les erreurs dues à une mauvaise implication des opérateurs en matière de sécurité, les erreurs dues à un moment d'inattention, les erreurs dues à la formation ou des instructions insuffisantes, les erreurs dues à une inadéquation entre les capacités personnelles et la situation, les erreurs dues au manque d'équipements de prévention / protection, et les erreurs commises par les gestionnaires en raison du manque de supervision et de réunions régulières, ou encore d'un manque d'engagement de la direction en matière de sécurité.

Dans ce contexte organisationnel, un opérateur de maintenance qui n'est pas stressé, bien formé, en utilisant des instructions et des procédures pertinentes, sous aucune pression de temps, impliqué dans l'élaboration de programmes et l'identification de solutions de sécurité, pourra probablement compléter toutes les opérations de maintenance prévues en toute sécurité et à un haut niveau. Cependant, plus ces conditions ne sont pas respectées ; l'équipement peut devenir mal entretenu causant des dommages directs et augmenter le risque pour les opérateurs de maintenance.

Ces conditions mettent en évidence la complexité de la tâche de maintenance. Ce caractère complexe est relié à une proportion importante des accidents graves se produisant dans les usines. En effet, lors des tâches de maintenance (comme l'inspection et la réparation), le travail est effectué dans des conditions complexes qui impliquent plusieurs interactions entre les opérateurs et l'organisation des activités de maintenance (Dubois, 2003; Cuny and Gaillard, 2003).

Par conséquent, l'analyse des risques professionnels dans la maintenance doit être l'un des défis majeurs de toute activité industrielle pour protéger la santé et la sécurité des opérateurs.

3.3. Les dangers liés aux activités de maintenance

Les travailleurs de maintenance sont exposés à plusieurs dangers au travail comme les opérations de verrouillage et d'étiquetage. Il y a des dangers physiques tels que le bruit, les vibrations, la chaleur et le froid excessive (travailleurs en plein air de maintenance), le rayonnement, la charge de travail physique élevée et mouvements épuisants (transportant des matériaux lourds, de flexion, à genoux, et atteignant, poussée et de traction, et travaillant dans de petits endroits). Il y a des risques mécaniques comme l'écrasement, l'écrêtage, l'enchevêtrement, les chocs, la perforation, piqûre, abrasion, éjection de fluide à haute pression. Les ouvriers de maintenance sont également exposés à des risques liés à l'électricité (les deux principaux sont le choc électrique et d'incendie). Ils sont souvent exposés à d'autres risques quand ils sont en contact avec la vapeur ou gaz, des particules (poussière, fumée), et des brouillards.

Par ailleurs, la maintenance a évolué dans le temps et devenu aujourd'hui une tâche complexe qui fait intervenir plusieurs éléments qui sont en interaction (Grusenmyer, 2005b).

4. CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons abordé le cadre général de la maintenance : ses définitions, son histoire et son évolution dans le temps, ses objectifs globaux, ses niveaux, ses formes d'organisation et ses types existants avec une comparaison entre ces différents types. En outre, nous avons présenté les risques et les accidents qui peuvent survenir dans les activités de maintenance. Le chapitre suivant présente le terrain d'expérimentation qu'est le site de stockage de GPL de l'entreprise PRIMAGAZ. L'objectif est de maîtriser les risques que peuvent survenir lors des opérations de maintenance des équipements de transfert de GPL.

BIBLIOGRAPHIE

Arunraj, N.S., Maiti, J., 2007. Risk-based Maintenance, Techniques and Applications. Journal of Hazardous Materials. 142, pp. 653-661.

Baker, J.A., 2007. The Report of the BP US Refineries Safety Review Panel. US Chemical and Hazard Investigation Board, Washington.

Barbet L., Blaise J.C., Bonnaud C., Caillet J.P., Grusenmyer C., Pomian J.L., Tierno O., 2005. Maintenance of risk activities ED123. Sheets INRS Safety Practices.

Barbet L., Blaise J.C., Bonnaud C., Caillet J.P., Grusenmyer C., Pomian J.L., Tierno O., 2013. Maintenance of risk activities ED123. Sheets INRS Safety Practices.

Baston R.G, Ray P.S., Wan Q., Weems W.H., 1999. How preventive maintenance impacts Gatlinburg TH. Maintenance and Reliability Centre, University of Tenessee.

Blackman, H.S., Siu, N., Mosleh, A., 1998. Human Reliability Models: Theoretical and Practical Challenges. International Workshop Series on Advanced Topics in Reliability and Risk Analysis. Centre for Reliability Engineering, University of Maryland.

Carrillo-Castrillo, J.A., Rubio-Romero, J.C., Guadix J., Onieva L., 2015. Risk assessment of maintenance operations: the analysis of performing task and accident mechanism. International Journal of Injury Control and Safety Promotion, Volume 22, Issue 3, 2015, pp. 267-277. doi: 10.1080/17457300.2014.939196.

Cuny, X., Gaillard, I., 2003. Occupational risks today: current problems, methodological perspectives and directions. In D.R. Kouabenan, M. Dubois (eds.), Occupational hazards, changing Approaches, new perspectives. Toulouse, Octers Editions, 25-36

Dubois, M., 2003. Introduction. In D.R. Kouabenan, M. Dubois (eds.), Occupational Hazards, changing approaches new perspectives. Toulouse, Octars Editions, 13-19.

Eisenmann, R. S., and Eisenmann, R.J., 1997. Applied condition monitoring. Machinery malfunction diagnosis and correction, vol. 13, 1997, pages 703–741.

EU-OSHA (European Agency for Safety and Health at Work), 2010. Maintenance and Occupational Safety and Health: A statistical picture. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities. ISBN-13: 978-92-9191-328-2.

Francastel, J.-C., Jourden, P., 2005. Pratique de la maintenance industrielle : Méthodes – Outils - Applications, Ed. Dunod, Paris, mise à jour de juin 2005.

Gallo, A., 1999. The Animals, Psychology and Behaviour, p. 63.

Gran, B., Bye, R., Nyheim, O., Okstad, E., Seljelid, J., Sklet, S., 2012. Evaluation of the risk OMT model for maintenance work on major offshore process equipment. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 25(3), 582e593.

Giraud L., Ait-Kadi, D., 2001. Maintenance: state of knowledge and exploratory study. Activities quotes of IRSST, Montreal (Quebec), 27.

Grusenmyer, C., 2000. Maintenance Operation and safety interactions. Bibliographic study: Maintenance tasks: definition and characteristics contributing to their criticality. Scientific and Technical notes INRS, 188, 46 p.

Grusenmyer, C., 2002. Maintenance-operation and safety interactions: Exploratory study Documentaries Notes. Notebooks of INRS, I86, pp, 53-66.

Grusenmyer, C., 2005b. Accidents related to maintenance: Literature review. Scientific and Technical notes INRS 248, Vandoeuvre, 68p.

Hale, A.R., Heming, B.H.J., Smit, K., Rodenburg, F.G.Th., Van Leeuwen, N.D., 1998. Evaluating safety in the management of maintenance activities in the chemical process industry. Safety Science, 28, 1, pp. 21-44.

Hollnagel, E., 2000. Looking for errors of omission and commission or The Hunting of the Snark revisited. Reliability Engineering and System Safety 68, 135–145.

Hopkins, A., 2008. Failure to Learn. The BP Texas City Refinery Disaster. CCH, Sydney.

Khan, F. I., Haddara, M., 2003. Risk-based maintenance (RBM): a quantitative approach for maintenance/inspection scheduling and planning. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 16(6), pp.561–573.

Kletz, T., 2001. Learning from Accidents. Gulf Professional Publishing, Oxford.

Kletz, T., 2003. Still Going Wrong. Elsevier, Amsterdam.

Lapointe, J.B., St-Marseille, M., 1997. La gestion des équipements : vers l'entretien préventif. Guide pour la PME 2ème édition.

Leveson, N., Cutcher-Gershenfeld, J., Carroll, J.S., Barrett, B., Brown, A., Dulac, N., Marais, K. (2005). System approaches to safety: NASA and the space shuttle disasters. In: Starbuck, W.H., Farjoun, M. (Eds.), Organization at the Limit. Lessons from the Columbia Disaster. Blackwell Publishing, Oxford.

Lind, S., 2008. Types and Sources of fatal and severe non-fatal accidents in industrial maintenance. International Journal of Industrial Ergonomics, 38, pp. 927-933.

Male, G.E., 1998. Safety of transport and machinery. A survey of maintenance accidents attributed to technological failing. Health and Safety Executive Specialist Inspector Reports n°52, Sheffield (United Kingdom), February, 35.

Mason, S., 1990. Improving plant and machinery maintainability. Applied Ergonomics, 21, pp. 15-24.

Monchy, F., 1996. La fonction maintenance. Formation à la gestion de la maintenance industrielle. Paris, Masson, 457 p.

Nguyen Thi, P.K., 2012. Politiques de maintenance et d'investissement sous evolution technologique incertaine. Thèse doctorat, Ecole Centrale de Nantes.

Øien, K., Schjølberg, P., Meland, O., Leto, S., and Spilde, H., 2010. Correct maintenance prevents major accidents. MaintWorld, 26 and 28.

Okoh, P., Haugen, S., 2013. The influence of Maintenance on some selected major accidents. CEt Chemical Engineering Transactions, Vol. 31, 2013.

Okoh, P., Haugen, S., 2014. A study of maintenance-related major accident cases in the 21st century. Process Safety and Environmental Protection, http://dx.doi.org/10.1016/j.psep.2014.03.001

Pichot, C., 2006. Health and Safety on the Work Floor: Maintenance Jobs. AFIM, Paris, France.

Pintelon, L., Parodi-Herz A., 2008. Maintenance: An evolutionary Perspective. Complex System Maintenance Handbook. Springer Series in Reliability Engineering.

Pintelon, L, N. Muchiri P., 2009. Safety and Maintenance. Handbook of Maintenance Management and Engineering. Springer Dordrecht Heidelberg London New York; 2009.p.613-646.

Raouf, A., 2004. Productivity enhancement using safety and maintenance integration: an overview. Int J Syst Cybernet 2004; 33:1116–1126.

Rasmussen, J., 1997. Risk management in a dynamic society: a modelling problem. Safety Science, Volume 27, No. 2/3 (1997): 183-213, doi: 10.1016/S0925-7535(97)00052-0.

Ray, P.S., Baston, R.G., Weems, W.H., Wan, Q., Sorock, G.S., Matz, S., Cotnam, J., 2000. Impact of maintenance function on plant safety. Professional Safety, August, 45-48.

Reason, J., 1990. Human Error. New York, NY: Cambridge University Press.

Reason, J., 1997. Managing the Risks of Organisational Accidents, Ashgate.

Rosness, R., Blakstad, H.C., Forseth, U., Dahle, I.B., Wiig, S., 2012. Environmental conditions for safety work-theoretical foundations. Safety Science, 50, pp. 1967-1976.

Sanders, R. 2005. Maintenance-induced accidents and process piping problems. In Chemical process safety: Learning from case histories (3rd ed.). (pp. 91e123) Elsevier Inc.

Simard, M., Marchand, A., 1997. Participation of the Workers in the Prevention of Occupational Accidents: Forms, Efficacy and Determinants, Report R-154, IRSST, Montreal, 1997, p. 40.

Smith, E. J., and Harris, M. J., 1992. The role of maintenance management deficiencies in major accident causation'. ARCHIVE: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering, 1989e 1996 (vols. 203e210) 206(15), 55-66.

Sheu, C., Krajewski, L., 1994. A decision model for corrective maintenance management", IJPR, vol. 32, no. 6, 1994, pages 1365–1382.

Starbuck, W.H., Farjoun, M., 2005. Organization at the Limit. Lessons from the Columbia Disaster. Blackwell Publishing, Oxford.

Vaughan, D., 1996. The Challenger Launch Decision. The University of Chicago Press, Chicago.

Vautrin, J.P., Edwards, R., Nicolaisen, P., 1992. Robots and automated assembly. Impact of their use on the working conditions within the European commonality, 146, 455-478.

Vinnem, J., Bye, R., Gran, B., Kongsvik, T., Nyheim, O., Okstad, E., 2012. Risk modelling of maintenance work on major process equipment on offshore petroleum installations. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 25(2), 274e292.

Vinnem, J. E., 2012. On the analysis of hydrocarbon leaks in the Norwegian offshore industry. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 25(4), 709e717.

Vinnem, J. E., 2013. On the development of failure models for hydrocarbon leaks during maintenance work in process plants on offshore petroleum installations. Reliability Engineering and System Safety, 113, 112e121.

Wagenaar, W.A., Groeneweg, J., Hudson, P.T.W., Reason, J.T., 1994. Promoting safety in the oil industry. Ergonomics 37 (12), 1999–2013.

Wallace, S., Merritt, C., 2003. Know when to say 'when': a review of safety incidents involving maintenance issues. Process Safety Progress, (4), 212e219.

Wang, H., 2002. A Survey of Maintenance Policies of Deteriorating Systems. European journal of operational research, 139, pp. 469–489.

CHAPITRE II

PRÉSENTATION DU TERRAIN D'EXPÉRIMENTATION :

UN SITE DE STOCKAGE DE GPL DE L'ENTREPRISE PRIMAGAZ

INTRODUCTION 45
1. LES ACTIVITÉS DE GAZ DE PÉTROLE LIQUÉFIÉ : GPL 45
2. LES ACCIDENTS LIÉS AUX ACTIVITÉS DE GPL ET LES DANGERS ASSOCIÉS 46
2.1. Les accidents liés aux activités de maintenance dans la chaîne logistique de GPL 46
2.2. Les phénomènes dangereux consécutifs aux accidents de GPL 47
2.2.1. Le BLEVE 47
2.2.2. L'UVCE 48
2.2.3. Le Jet Enflammé 49
3. L'ÉTUDE DE CAS : LE SITE DE STOCKAGE ET DE DISTRIBUTION DE GPL 49
3.1. Présentation de l'entreprise d'accueil : PRIMAGAZ 49
3.2. Le Site Relais Vrac 50
3.3. Opérations de chargement/déchargement 53
4. LES ACTIVITÉS DE MAINTENANCE DANS LA CHAÎNE LOGISTIQUE DE GPL 56
4.1. Fonction de maintenance au sein du site relais vrac 56
4.2. Consignation des opérations de maintenance 57
5. CONCLUSION 59
BIBLIOGRAPHIE 59

INTRODUCTION

Le secteur industriel, plus particulièrement les activités industrielles, sont des activités très dangereuses et présentent des risques incontournables, surtout les activités du domaine de pétrochimique. L'un des secteurs d'activité identifié dans le cadre de ce domaine est celui du GPL, à savoir es installations ayant des activités de stockage, de chargement et de déchargement de GPL (dépôts, relais vrac et centres remplisseurs) (Lim, 2008).

En effet, le GPL (Gaz de Pétrole Liquéfié) est considéré comme un sous-produit de l'industrie pétrochimique et devenu récemment à partir de 20ème siècle, développée à partir des années 1930, une source énergétique puissante.

Ce chapitre présente les activités de GPL, les accidents et les phénomènes dangereux associés à ces activités. Ensuite, il décrit aussi bien notre champ d'étude qui correspond à une chaine logistique de site Relais Vrac de l'entreprise PRIMAGAZ, que les opérations de maintenance effectuées au sein de ce site.

1. LES ACTIVITÉS DE GAZ DE PÉTROLE LIQUÉFIÉ : GPL

Les gaz de pétrole liquéfié GPL est un gaz liquéfié à faible pression contenant un ou plusieurs hydrocarbures légers qui est principalement constitué de propane, de propène, de butane, des isomères du butane, de butène avec des traces d'autres gaz d'hydrocarbures. Le propane et le butane en sont les constituants principaux. Le gaz de pétrole peut être stocké et/ou manipulé en phase liquide dans des conditions de pression modérées et à température ambiante (Lim, 2008; Pierini, 2015).

Les GPL proviennent principalement des champs de gaz naturel pour plus de 60%, et pour moins de 40% du raffinage du pétrole brut. En effet, en chauffant du pétrole, on obtient environ 2 à 3% de GPL. Les GPL sont stockés dans des réservoirs aériens, sous talus ou cavernes, puis ils sont acheminés jusqu'au client final. Le GPL consommé en Europe provient principalement du Royaume-Uni, de la Norvège et du pourtour méditerranéen (Lim, 2008; Pierini, 2015). Le transport des GPL obéit à la réglementation du transport des marchandises dangereuses: l'ADR (Accord Européen relatif au Transport International des marchandises Dangereuses par Route), et le RID (Règlement concernant le Transport International Ferroviaire des Marchandises Dangereuses).

Le secteur de GPL en France représente à peu près 6000 sites industriels. Ces sites se divisent en : Dépôts bouteilles, centres emplisseurs pour le remplissage de bouteilles, les relais vrac où sont chargés les camions-citernes alimentant les réservoirs en clientèle.

Les activités d'un stockage industriel de GPL sont le conditionnement, le stockage et la distribution de GPL.

Les stockages réceptionnent le GPL en provenance des raffineries ou de champs de gaz par voie routière, ferroviaire, maritime ou par canalisation. Puis le GPL est transporté vers

d'autres dépôts ou relais vrac par wagons-citernes, par camions, par voie maritime. Le relais vrac permet d'approvisionner en GPL par camions la clientèle de proximité (particulière ou industrielle). Le conditionnement des bouteilles de gaz se fait dans les centres emplisseurs. La distribution se fait par voie routière depuis les relais vrac pour assurer l'emplissage des citernes et depuis les centres emplisseurs pour les bouteilles (Le and De Dianous, 2008).

2. LES ACCIDENTS LIÉS AUX ACTIVITÉS DE GPL ET LES DANGERS ASSOCIÉS

Le secteur de GPL est un secteur d'accidentologie à tous les niveaux, principalement lors du transport de GPL.

Le Bureau d'Analyse des Risques et Pollutions Industriels (BARPI) et la base ARIA (Analyse, Recherche et Information sur les Accidents) rassemblent et recensent des données sur les causes, les conséquences et sur les circonstances des incidents/accidents survenus dans les activités de GPL.

Dans les sections suivantes, nous présentons les accidents liés aux activités de maintenance au sein de la chaîne logistique de GPL.

2.1. Les accidents liés aux activités de maintenance dans la chaîne logistique de GPL

Le domaine GPL a une longue histoire marquée par des progrès technologiques et par des accidents majeurs qui ont fait évoluer les techniques et pratiques autour des GPL. Parmi les accidents marquants dans le domaine du GPL, selon l'étude faite par l'INERIS (Lim, 2008) : la catastrophe de Feyzin en France en 1966, la catastrophe de San Juan Ixuatepec au Mexique en 1984, et celle d'Izmit en Turquie en 2002. Des accidents plus récents introduits en France sont centralisés dans la base de données ARIA (Analyse Recherche et Information sur les Accidents) tels que l'accident Bollene en 2008, l'accident de Morannes en 2011, l'accident Bastia en 2014, et l'accident de Le Lamentin en 2015. La survenue de la plupart de ces accidents et incidents est due à un manque, à un problème, à un défaut ou à un retard de maintenance.

L'accident de Port Newark aux Etats-Unis, le 07 Juillet 1951 est dû à un défaut de fonctionnement de la vanne d'isolement interne du réservoir provoque son explosion qui a fait 11 blessures.

L'accident de Feyzin est dû à la méconnaissance des consignes. Un aide opérateur n'a pas suivi la procédure opératoire et manœuvre dans le mauvais ordre les vannes en série qui givrent et se bloquent en position ouverte ce qui a engendré une fuite de propane générant un nuage inflammable. Des explosions brutales faisant 18 morts, 84 blessés et d'importants dommages matériels ont été conséquences de cet acte.

L'accident de Texas city (États-Unis) survenu le 30 mai 1978 a généré 7 morts, 10 blessures et un coût global estimé à 100M$ selon (Lim, 2008), à cause de la défaillance d'un ensemble

de systèmes de détection : défaillance du système de jauge, des soupapes et des détecteurs de niveau. Ces mêmes causes qui ont menés à l'accident de Montréal (Canada) le 08 Janvier 1957, l'accident de Mc Kittrick (Etats-Unis) le 28 Mai 1959, et celui de Izmit (Turquie) le 21 Août 2002.

Les accidents majeurs, qui ont marqué le secteur des GPL, ont permis à l'industrie du GPL de s'organiser face aux situations accidentelles que ce soit au niveau de la prévention, qu'au niveau de la gestion de crise en évoluant des technologies et des pratiques d'exploitation.

2.2. Les phénomènes dangereux consécutifs aux accidents de GPL

Un phénomène dangereux correspond à une libération d'énergie ou de substance produisant des effets susceptibles d'infliger un dommage à des cibles (ou éléments vulnérables) vivantes ou matérielles, sans préjuger de l'existence de ces dernières (ISO/CEI 51). C'est une « sources potentielle de dommages ».

Les phénomènes dangereux qui peuvent être générés par les accidents liés aux activités de GPL et plus particulièrement les activités de maintenance dans la chaîne logistique de GPL, en excluant les incendies sont :

- Le BLEVE, dont les conséquences sont avant tout liées aux flux thermiques ;
- L'UVCE, dont les conséquences dépendent des effets de surpressions ;
- Le rejet de substances toxiques pour la santé et l'environnement.

Ces phénomènes dangereux sont détaillés davantage dans la circulaire du 10 mai 2010, dans les travaux réalisés par le Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable Français (2006a ; 2006b ; 2006c ; 2006d), par Mouilleau *et al.,* (1999), et par Laurent (2011).

2.2.1. Le BLEVE

Le BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion) est la vaporisation explosive d'un liquide porté à ébullition correspond à un scénario analogue à une explosion induite par l'expansion rapide des vapeurs inflammables produites par une substance gazeuses conservées sous pression en phase liquide dans un milieu confiné. De cet événement peuvent survenir des effets de surpression et des irradiations thermiques (boule de feu) pour les personnes et les structures. Tous les stockages de gaz liquéfiés sous pression sont susceptibles d'être le siège d'un BLEVE.

Ce type d'événement comporte trois principaux dangers sur l'environnement :

- ✓ L'onde de choc ou effet de pression : engendré par une brusque variation de pression et se produit en deux phases : l'onde de surpression et l'onde de dépression ;
- ✓ Le flux thermique : plus souvent provoqué par la boule de feu ;
- ✓ Les projectiles (effets missiles) : sont des fragments générés par l'explosion du réservoir.

Les différentes étapes permettant la formation d'un BLEVE provoqué sur un réservoir contenant un hydrocarbure sont :

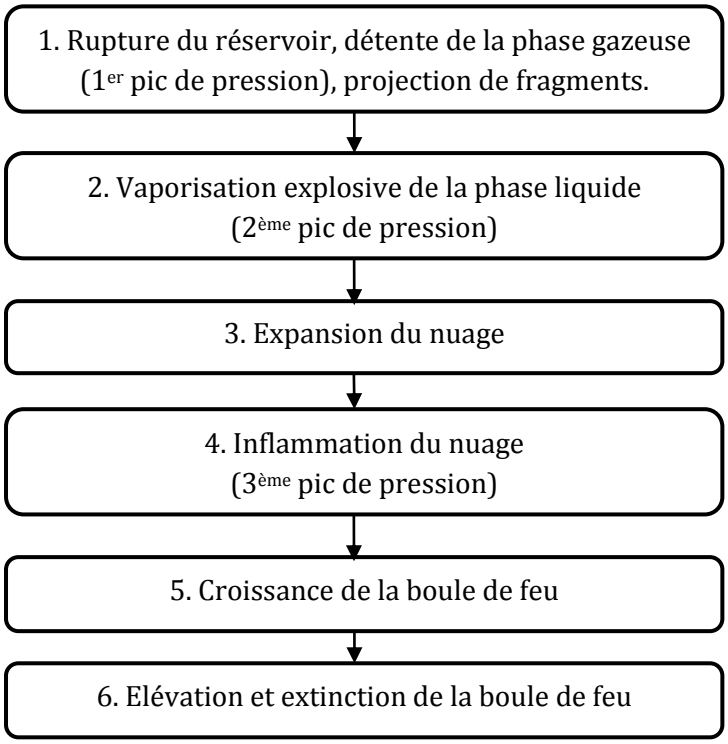


Figure II. 1. Les différentes étapes de la formation d'un BLEVE (Shield, 1993).

2.2.2. L'UVCE

Un UVCE (Unconfined Vapour Cloud Explosion) est un scénario d'accident induit par le rejet et la dispersion dans un milieu non confiné d'une substance inflammable en phase gazeuse ou de vapeur, à partir de laquelle peuvent survenir, en cas de source d'ignition, des effets thermiques et de surpression pour l'Homme, les structures et l'environnement. A partir de cette explosion se produisent des effets thermiques et des surpressions qui dépendent principalement des conditions locales et, plus particulièrement, des conditions météorologiques et de mélange des gaz.

Selon la circulaire du 10 mai 2010 (qui récapitule les règles méthodologiques applicables aux études de dangers, à l'appréciation de la démarche de réduction du risque à la source et aux plans de prévention des risques technologiques dans les installations classés en application de la loi du 30 juillet 2003), les effets thermiques sur l'homme sont principalement induits par le passage de la flamme et, par conséquent, les effets létaux concernent toutes les personnes se trouvant sur le parcours de la flamme, alors que les effets sur les structures sont limités, généralement, aux dommages superficiels même si parfois on peut constater de légères fissures sur les structures métalliques.

Les effets de surpression, en raison de l'ampleur de l'onde de pression générée, sont directement proportionnels à la rapidité avec laquelle le front de flamme se propage : plus la vitesse de propagation du front de flamme est grande, plus son accélération est élevée et plus les surpressions sont importantes. Les effets de surpressions sont inversement proportionnels

à la distance par rapport au point d'ignition mais ils varient fortement si l'environnement présente des obstacles.

Un UVCE comprend généralement les étapes suivantes :

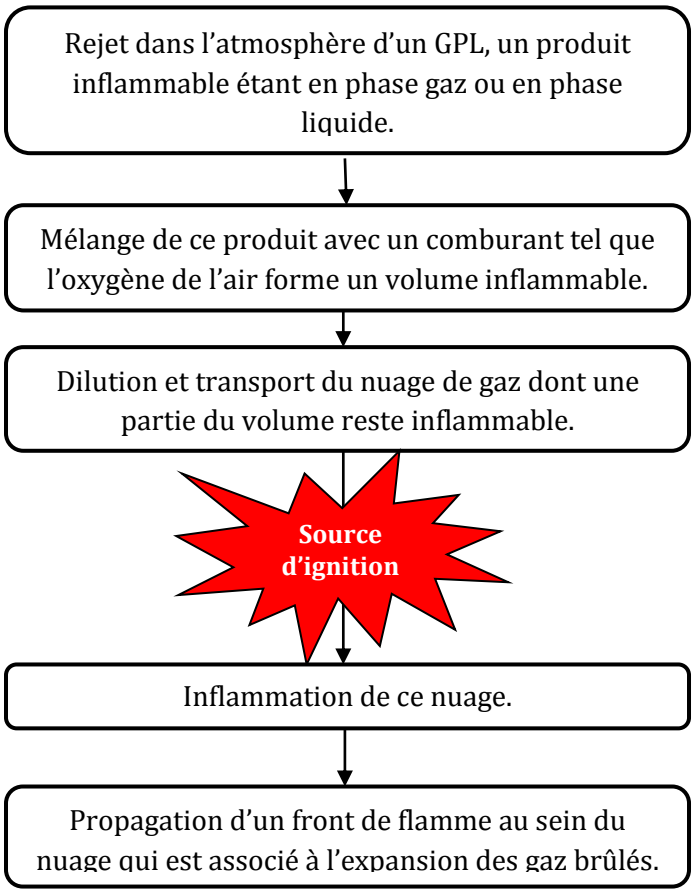


Figure II. 2. Formation d'un UVCE (inspiré de circulaire 10 mai 2002).

2.2.3. Le Jet Enflammé

Lorsqu'un jet liquide ou gazeux issu d'une fuite accidentelle s'enflamme par l'intermédiaire d'une source quelconque, le jet enflammé prend naissance sous forme d'une flamme de diffusion. Le jet turbulent combustible émerge d'une canalisation ou d'un orifice et entre en interaction avec l'air ambiant qui est en général au repos. Le jet combustible se mélange à l'air par entraînement et par diffusion et, à l'aide d'une source d'inflammation, se met à brûler seulement aux endroits où les concentrations de combustible et d'air sont comprises dans une plage définie dans ses limites d'inflammabilité.

3. L'ÉTUDE DE CAS : LE SITE DE STOCKAGE ET DE DISTRIBUTION DE GPL

3.1. Présentation de l'entreprise d'accueil : PRIMAGAZ

PRIMAGAZ est une compagnie des Gaz de Pétrole implanté depuis 1934 en France. Elle fournit aujourd'hui en Europe et sur le pourtour méditerranéen plus de trois millions de tonnes de butane et de propane.

En 1982, le groupe néerlandais SHV entre dans le capital de PRIMAGAZ France. En 1999, il devient l'unique actionnaire de la société. En 2011, PRIMAGAZ a distribué sur le territoire français 400 000 tonnes de GPL. Elle emploie environ 420 personnes, et fournit plus de 220 000 clients sur le territoire national.

Les moyens de stockage et d'emplissage sont répartis sur tout le territoire français, il s'agit de:

- 3 terminaux maritimes : le stockage souterrain en caverne de 100 000 m^3, situé à Lavera permet de garantir l'approvisionnement des clients de l'entreprise. Les terminaux aériens de Brest et Ambés complètent celui de Lavera.
- 5 centres emplisseurs qui permettent d'assurer l'emplissage des bouteilles qui seront acheminées vers les points de livraison.
- 20 relais vrac afin de densifier le maillage du territoire. Cette logistique permet aux camions petits porteurs de changer le GPL destiné à la clientèle de proximité (les trois quarts de la clientèle PRIMAGAZ sont des clients GPL citerne, particuliers ou industriels).

Pour la distribution de GPL sur l'ensemble du territoire français, PRIMAGAZ France dispose d'environ 500 camions et de 150 wagons citernes (en location).

Dès 1996, la certification ISO 9002 pour la distribution de GPL et l'implantation de citernes chez ses clients était acquise. Elle a été étendue au printemps 1999 à la distribution de GPL en bouteille, puis aux Centres Emplisseurs et Relais Vrac, faisant de PRIMAGAZ France la 1ère entreprise française d'énergie GPL à être certifiée pour l'ensemble de ses activités.

Enfin, en juin 2002, PRIMAGAZ France passait avec succès l'audit de certification par le Lloyd's selon le nouveau référentiel ISO 9001 (version 2000).

Les filiales industrielles de PRIMAGAZ France sont IMPORGAL (Brest), LAVERA (Lavera), COBOGAL (Ambés), RHONE GAZ (Fayzin, Herrlisheim, Genlis), SIGALNOR (Le Hoc, Hauconcourt).

3.2. Le Site Relais Vrac

L'étude de cas aconsidérée dans ce travail se focalise particulièrement sur le site relais vrac et sur les camions-citernes pour le transport du GPL.

Le site Relais Vrac assure son approvisionnement par des camions-citernes gros porteurs en provenance des fournisseurs et assure la distribution du GPL auprès de ces clients par des camions-citernes petits porteurs. Le site se compose de :

- Un réservoir sous talus de propane : permettant de stocker le propane à température ambiante sous pression de vapeur saturante à axe horizontal de capacité de 400m^3. Le réservoir est protégé contre la corrosion externe par un revêtement en bitume et fil de

verre de 6mm d'épaisseur, ainsi que par une protection cathodique par électrodes sacrificielles.

- Les équipements de transfert situés en zone pomperie (pompe/compresseur/ tuyauterie) ;
- Un poste de chargement / déchargement des camions citernes gros porteurs : les camions déchargés sur le site sont des camions gros porteurs d'une capacité de 20 tonnes. Ces camions proviennent du site PRIMAGAZ de Lavera disposant d'une caverne de propane. Cette action conduit à l'emplissage du réservoir de stockage sous talus. Le déchargement camions s'effectue par l'intermédiaire d'un bras liquide et d'un bras gazeux ;
- Deux postes de chargement des camions citernes petits porteurs : les camions chargés sont des camions petits porteurs d'une capacité 3.5 tonnes, 6 tonnes ou 9 tonnes. Le remplissage de camions-citernes petits porteurs aux postes de chargement s'effectue à partir du réservoir de stockage sous talus. Ce sont ces camions qui livreront en propane la clientèle de PRIMAGAZ dans la région. Le chargement des camions s'effectue par l'intermédiaire d'un bras liquide ;
- Une zone de stationnement camions citernes et bouteilles ;
- Une zone de stockage bouteilles.

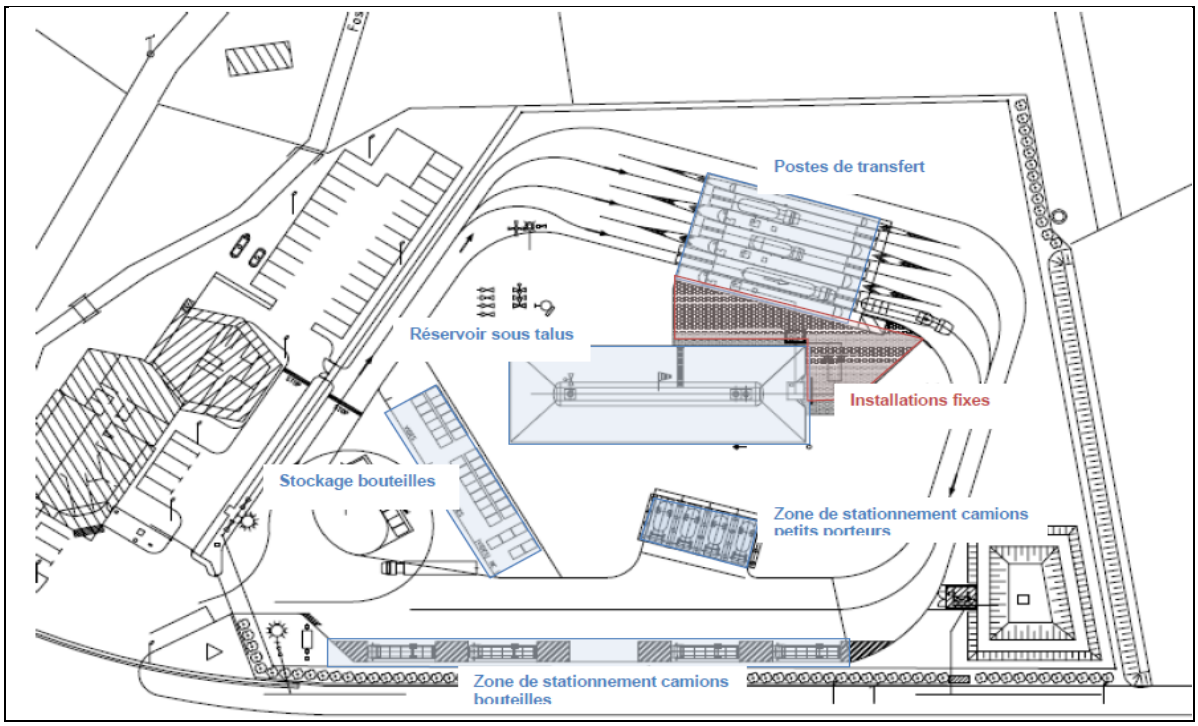


Figure II. 3. Cartographie du site Relais Vrac.

La figure II.4 illustre une représentation du site avec les différents éléments qui le compose. Le site Relais Vrac assure son approvisionnement auprès de ses fournisseurs (Lavera) par les camions gros porteurs et distribue le GPL à ses clients par les camions petits porteurs. Le site

comporte un réservoir sous talus de propane, des équipements de transfert (compresseurs, pompes, tuyauteries), deux postes de chargement des camions petits porteurs, un poste de chargement/déchargement des camions gros porteurs, et une zone de stationnement des camions-citernes.

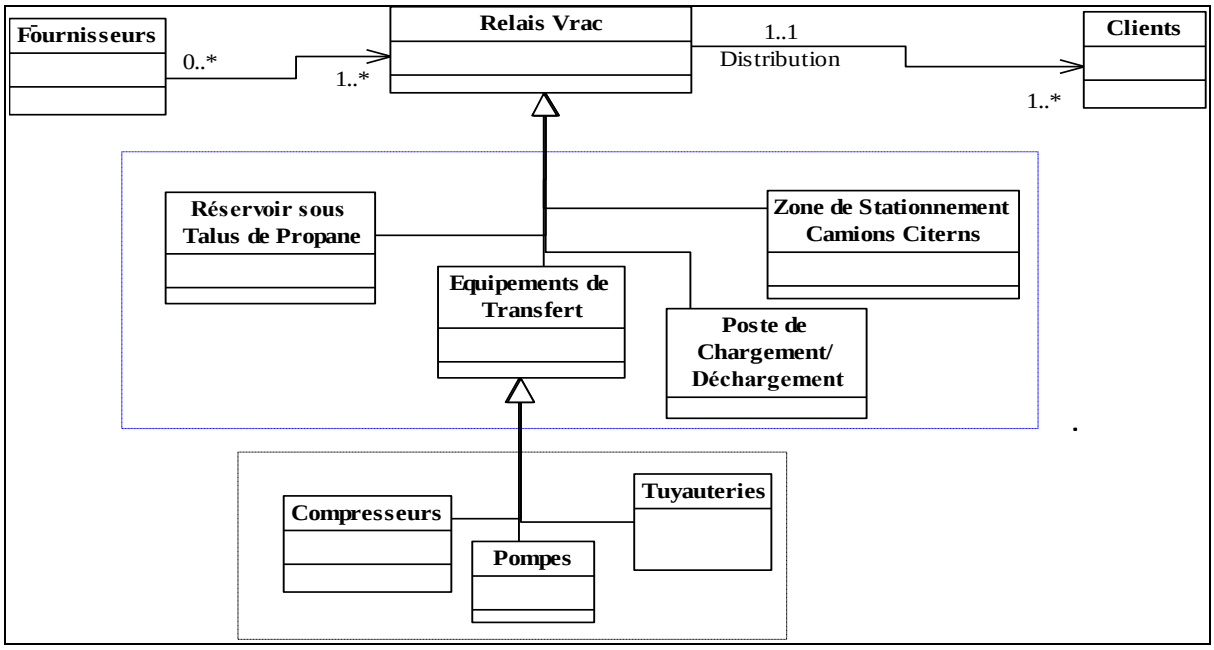


Figure II. 4. Représentation du Site Relai Vrac.

L'analyse des risques des activités de maintenance sera limitée sur les équipements de transfert situés dans la zone pomperie et plus spécifiquement sur les équipements suivants : Compresseurs, pompes, bras Gaz/ liquide et les détecteurs gaz et flamme comme ils sont schématisés dans la figure II.5.

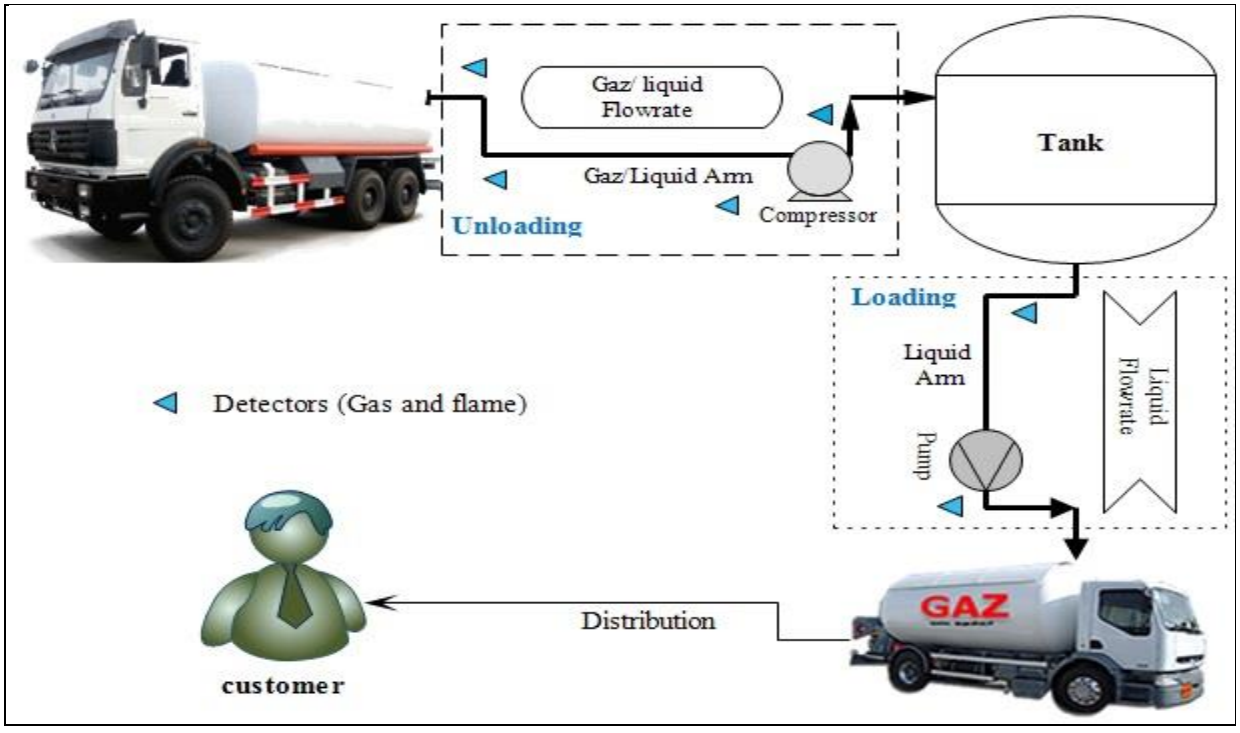


Figure II. 5. Représentation des équipements sélectionnés.

Pour mieux comprendre le système étudié, la figure II.6 représente un modèle simplifié qui montre les différentes interactions entre les éléments choisis constituant ce système.

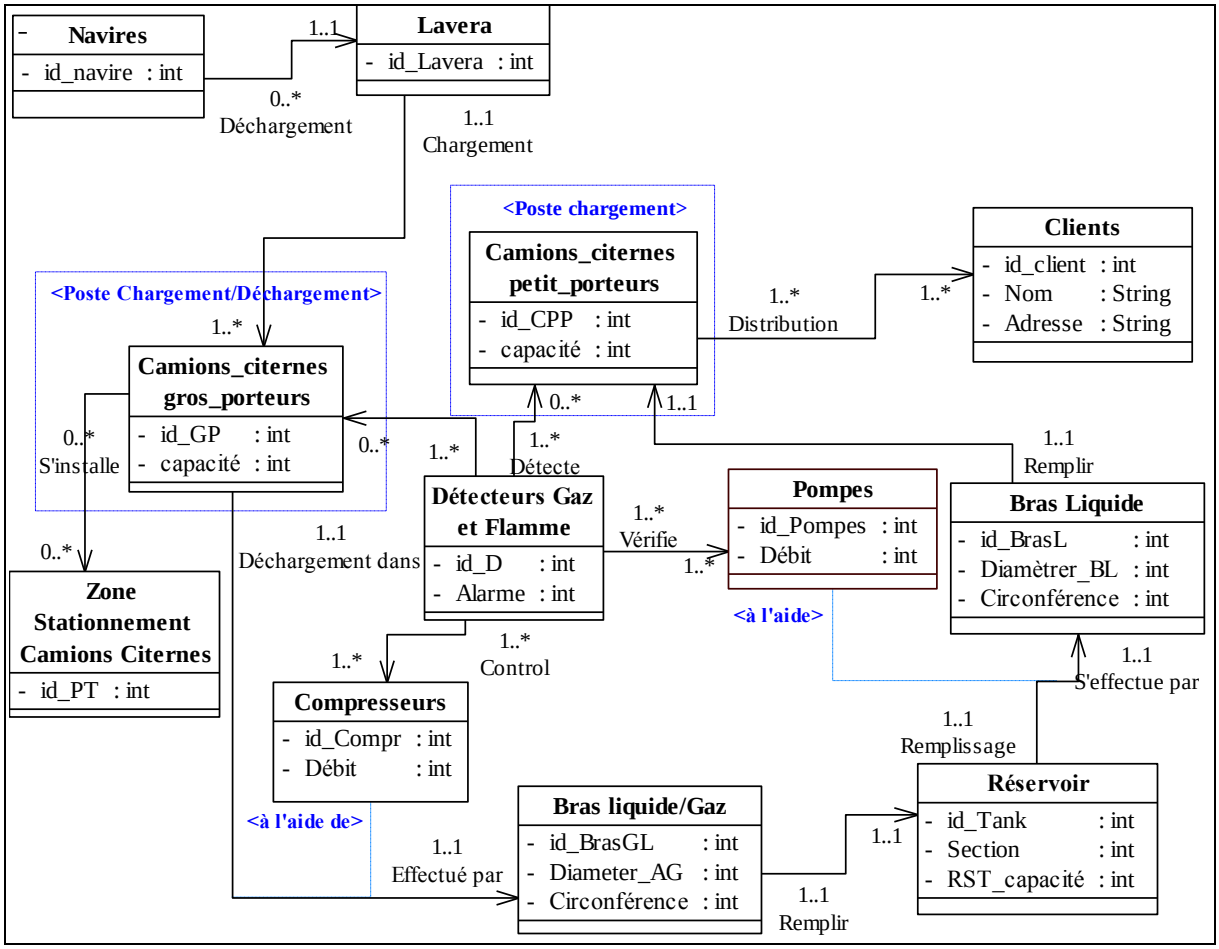


Figure II. 6. Le modèle UML du site Relais Vrac (Gallab *et al.*, 2016a).

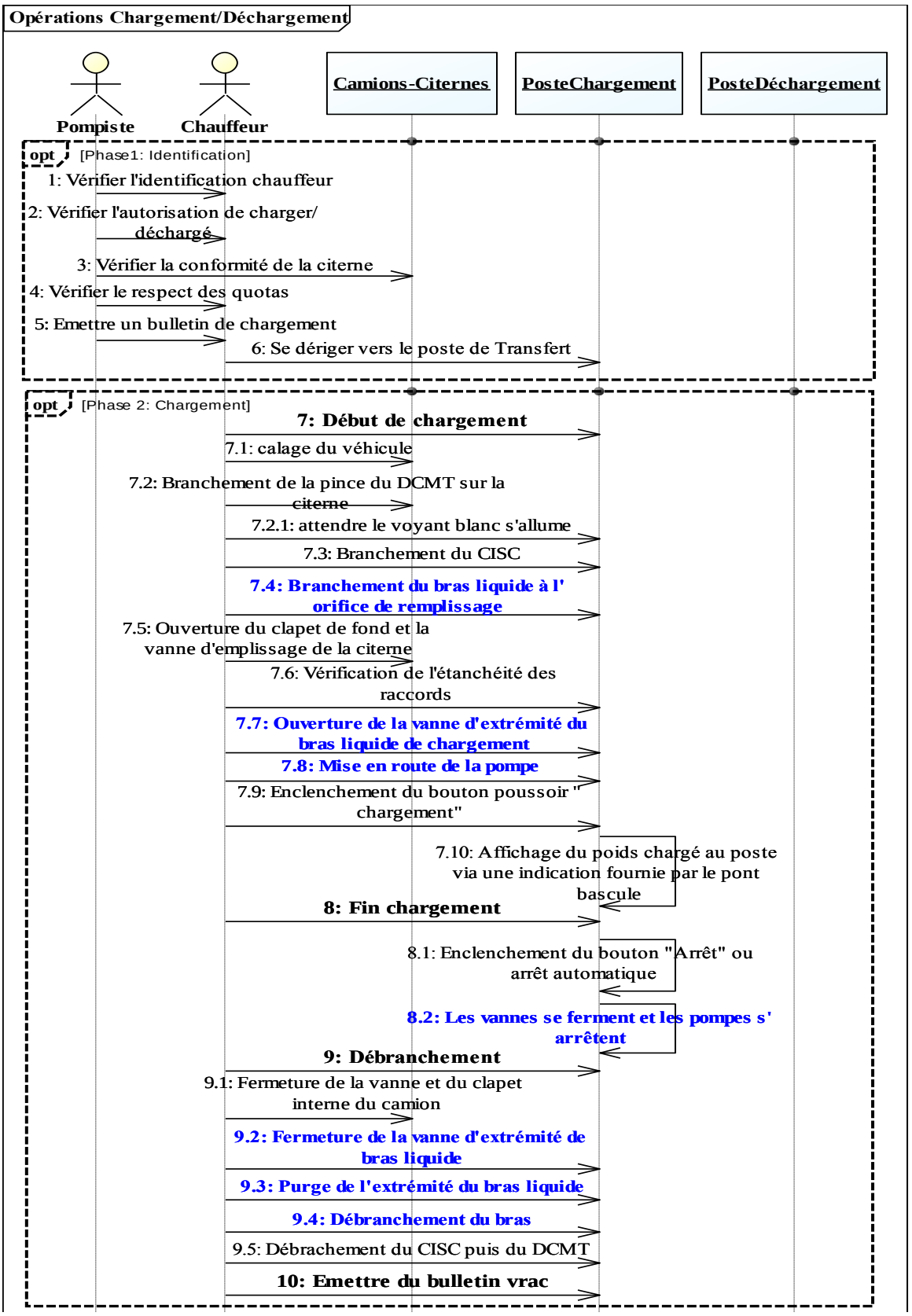
Les camions citernes gros porteurs chargent auprès de lavera et part vers le site relais vrac dans le poste de chargement et déchargement des camions-citernes gros porteurs pour le déchargement. Le déchargement se fait par le bras liquide/ gaz pour remplir le réservoir à l'aide des compresseurs. Le chargement des camions-citernes petits porteurs pour la distribution aux clients se fait dans le poste de chargement par le bras liquide attaché au réservoir en utilisant les pompes pour assurer le remplissage dans des bonnes conditions. Les détecteurs gaz et flamme sont installés dans les différents postes pour contrôler et vérifier le fonctionnement des installations.

3.3. Opérations de chargement/déchargement

Les opérations de chargement / déchargement s'effectuent par le chauffeur sous la surveillance d'un Exploitant Relais Vrac (ERV). Ces opérations sont divisées en trois phases. La première correspond à l'identification du chauffeur, la deuxième concerne les opérations de chargement et la troisième pour les opérations de déchargement.

L'ensemble de ces opérations sont formalisées par un diagramme de séquence comme illustré dans la figure II.7.

Les opérations en bleu sont des opérations liées aux équipements choisis. Le but est de voir l'influence des interventions de maintenance faites sur ces équipements sur les opérations de chargement / déchargement et sur toute la chaîne logistique.



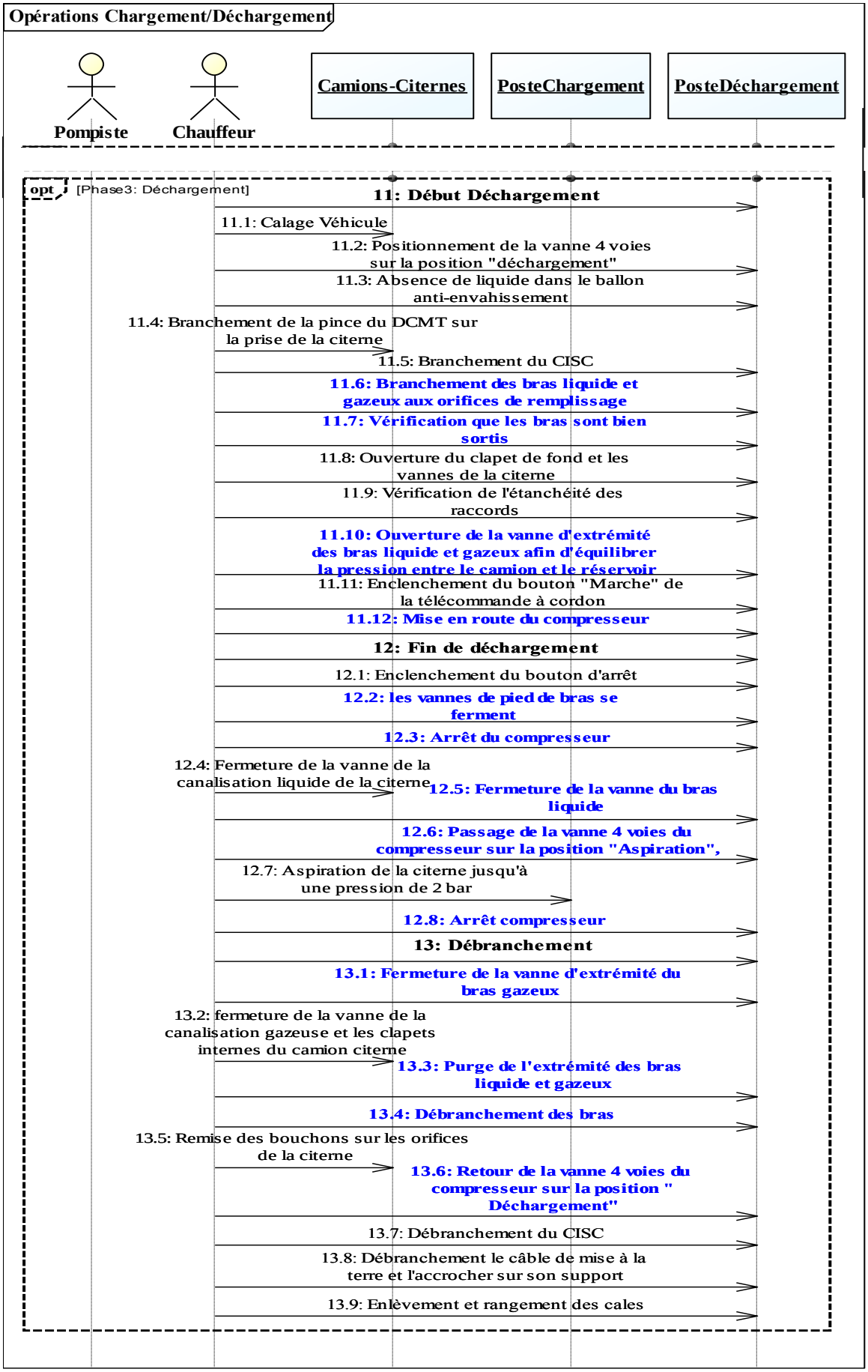


Figure II. 7. Diagramme de séquences des opérations de chargement/déchargement.

4. LES ACTIVITÉS DE MAINTENANCE DANS LA CHAÎNE LOGISTIQUE DE GPL

4.1. Fonction de maintenance au sein du site relais vrac

Le diagramme de classes illustré dans la figure II.8 indique les interactions entre les différentes entités de la fonction de maintenance.

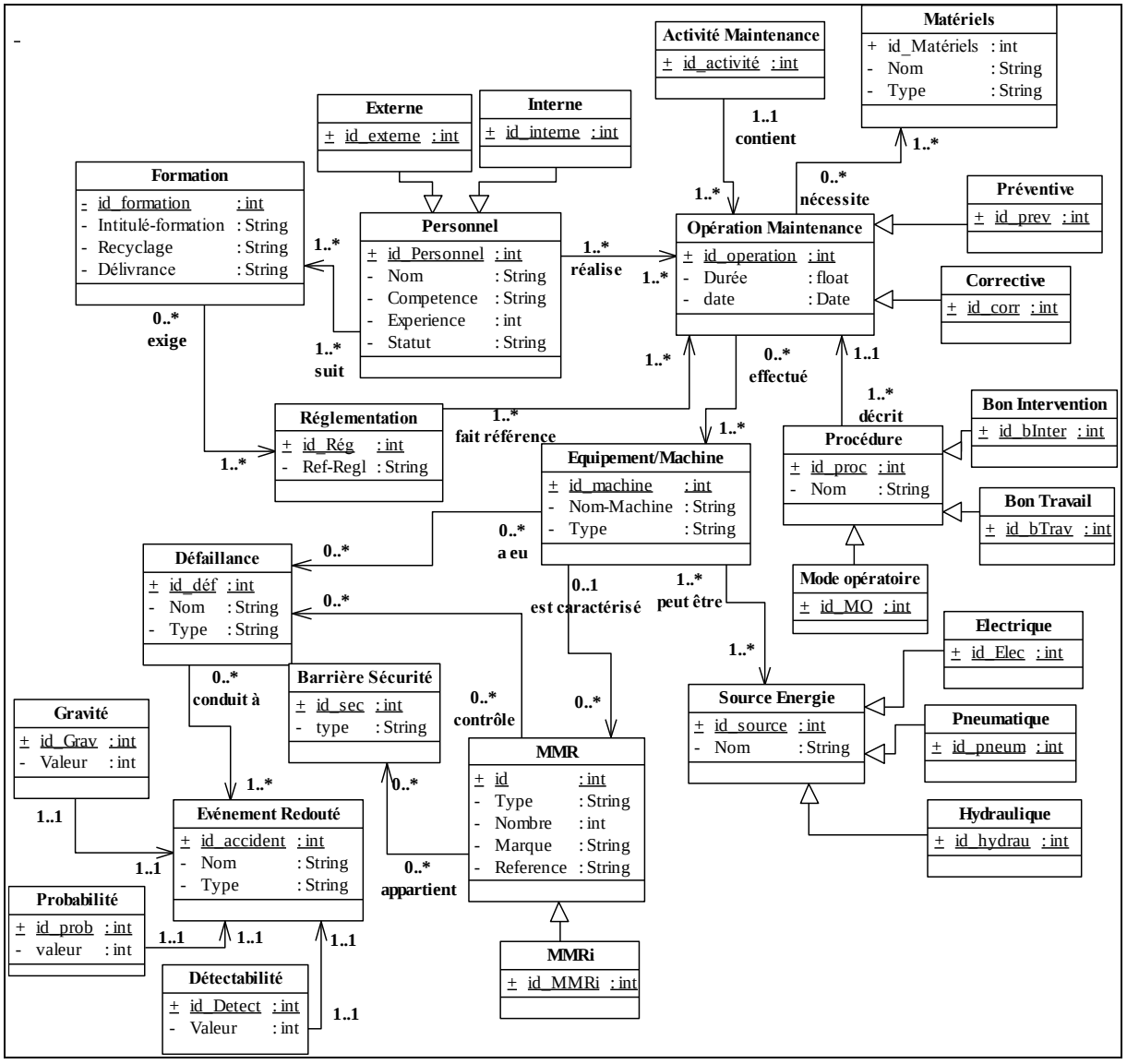


Figure II. 8. Diagramme de classe des opérations de maintenance (Gallab *et al.*, 2016a).

Un opérateur effectue une opération de maintenance qui peut être corrective ou préventive sur un ou plusieurs équipements. Cet opérateur (interne ou externe) doit suivre des formations et habilitations réglementaires telles que la formation sur la sécurité d'exploitation selon l'accord pétrolier de 1995 qui doit être réalisé dans le mois suivant la prise de fonction, et après chaque changement pertinent de la réglementation international de transport ADR, de la réglementation ATEX (ATmosphères EXplosible), ou ISO 9001, une formation de référence réglementaire sera planifiée à l'interne du site. Chaque opération de maintenance nécessite de

matériels et des procédures pour sa réalisation, d'ailleurs les opérateurs doivent suivre des consignations prescrites dans les modes opératoires avant d'entamer l'opération de maintenance. Un équipement peut être une source d'énergie électrique, pneumatique, hydraulique ou thermique. Cet équipement peut subir une défaillance qui mène à un événement redouté qu'il pourra être quantifié à l'aide la gravité et la probabilité. Pour contrôler et maîtriser les défaillances de maintenance, des barrières de sécurité sont mises en place. Ces barrières de sécurité sont dites également des mesures de maîtrise des risques ; ces mesures peuvent être des mesures techniques, des mesures organisationnelles ou mixtes. On appelle une Mesure de Maîtrise des Risques instrumentée (MMRi), une mesure qui fait appel à l'instrumentation de sécurité ou un ensemble d'éléments techniques et/ ou organisationnels pour assurer la fonction de sécurité.

4.2. Consignation des opérations de maintenance

Toute intervention sur une machine ou un équipement, qu'il s'agisse de maintenance préventive ou corrective, doit obligatoirement faire l'objet d'une consignation.

La personne en charge de la consignation identifie et sépare toutes les sources d'énergie alimentant l'installation (électrique, pneumatique, hydraulique), condamne en position d'ouverture pour interdire la manœuvre des organes de séparation avec des moyens adéquats (cadenas de consignation, collets, …), signale les organes consignés, vérifie l'absence d'énergie au niveau de l'installation, et dissipe les énergies. La consignation est tracée et contresignée par le responsable des travaux.

Avant d'entreprendre des travaux sur les réservoirs et les canalisations, il est nécessaire de procéder à leur vidange et leur dégazage. Les installations doivent être déliquéfiées puis dégazées afin de ramener la pression intérieure à une valeur proche de 1 bar. Le gaz purgé est récupéré ou brûlé à l'aide d'une torchère (avec interposition d'un clapet anti-retour). La figure II.9 expose les recommandations à respecter pour la réalisation d'une consignation et d'un dégazage.

Pour réaliser une intervention à l'intérieur d'un réservoir (vide ou partiellement rempli d'eau), il doit faire l'objet d'une autorisation de pénétrer rédigée par le responsable du site et cosigné par la personne intervenant à l'intérieur du réservoir.

Enfin, toute intervention ou opération, préventive ou corrective, réalisée doit être tracée en rédigeant un bon d'intervention, un compte-rendu, un bon de travail, etc.

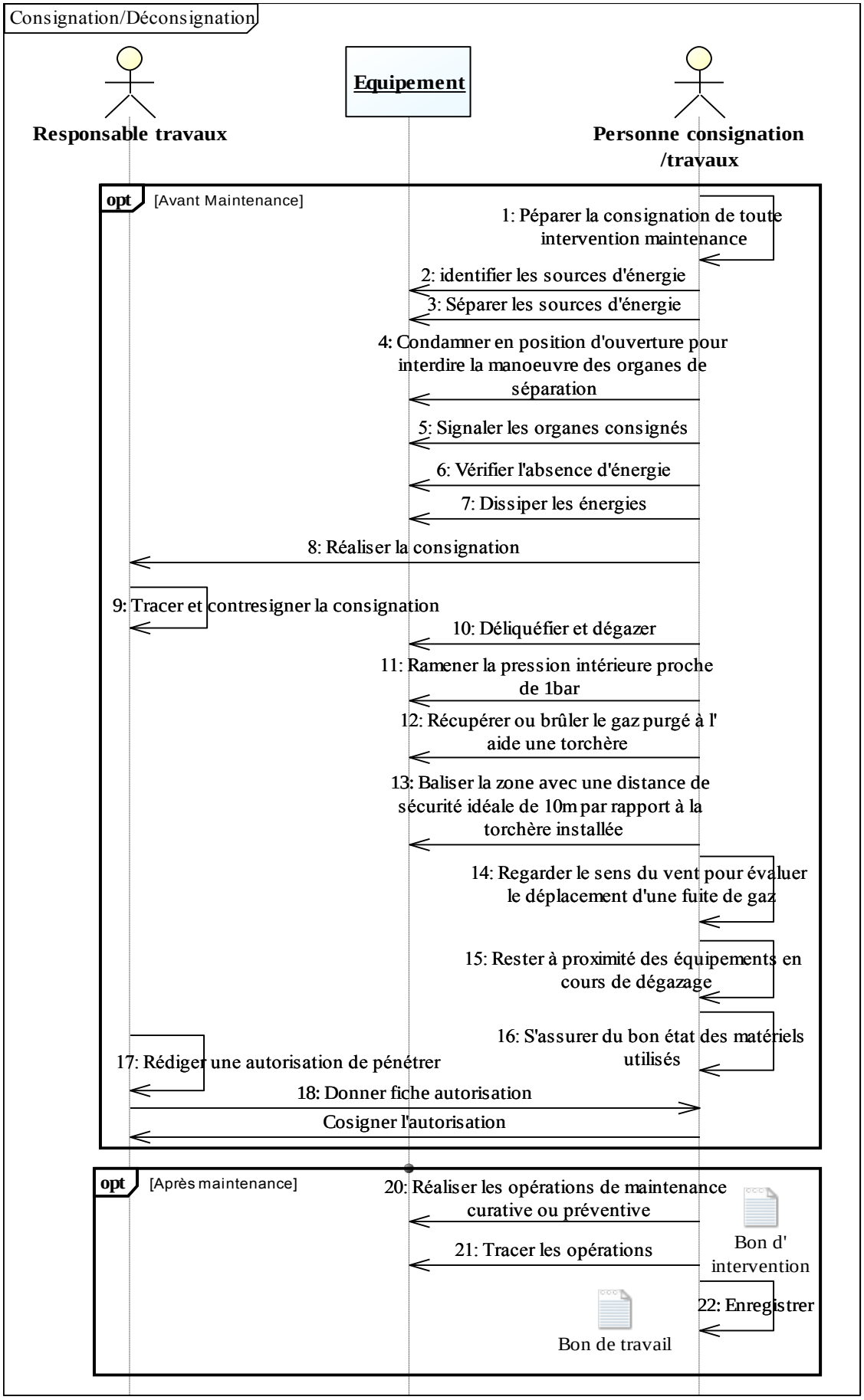


Figure II. 9. Consignation des opérations de maintenance.

5. CONCLUSION

La méthodologie que nous proposons au cours de ce travail sera appliquée sur la chaîne logistique de GPL du site Relais Vrac de l'entreprise PRIMAGAZ France. L'étude se focalisera sur la zone de transfert de GPL lors des opérations de chargement et déchargement des camions et particulièrement sur la maintenance des équipements suivants : les pompes, les compresseurs, les détecteurs et bras gaz/liquide. Le choix de ces équipements a été fait par l'industriel car il a constaté que ces équipements présentent plus de risque lors des interventions de maintenance.

Nous démontrerons dans le chapitre suivant la complexité des tâches de maintenance, mais avant, nous aborderons la signification et les caractéristiques d'un système complexe ainsi que l'approche permettant l'appréhension de cette complexité : approche systémique.

BIBLIOGRAPHIE

Gallab, M., Bouloiz, H., Tkiouat, M., Garbolino, E., ElKilni, M.A., 2016a. Simulation of Failure Scenarios related to Maintenance Activities. International Journal of Applied Engineering Research, Vol: 11, N°24, 2016, pp. 11935-11949.

Laurent, A., 2011. Sécurité des procédés chimiques (2° Éd.). Connaissances et méthodes d'analyse des risques. Coll. Génie des procédés de l'École de Nancy. 608p.

Le, N., De Dianous, V., 2008. Evaluation des dispositifs de prévention et de protection utilisés pour réduire les risques d'accidents majeurs, Ω10, Rapport d'étude n°DRA-08-95403-01561B, 01/09/2008 : INERIS pour le Ministère chargé de l'environnement, rapport disponible sur www.ineris.fr.

Lim, S., 2008. Influence des enseignements tirés d'accidents impliquant des stockages de GPL dans l'évolution des guides de bonnes pratiques à l'étranger. Rapport d'étude n°DRA-08-85166-00650B, 04/09/2008 : INERIS pour MEEDDAT/SEI/BARPI.

Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable, 2006a. Compréhension des phénomènes et modélisation : la dispersion atmosphérique.- 12p.

Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable, 2006b. Guide pour l'estimation des dommages matériels aux biens des tiers en cas d'accidents majeurs.

Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable, 2006c. Les phénomènes dangereux associés aux GPL dans les établissements de stockage hors raffineries et pétrochimie : le BLEVE.- 18p.

Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable, 2006d. Les phénomènes dangereux associés aux GPL dans les établissements de stockage hors raffineries et pétrochimie : Explosion de gaz à l'air libre (UVCE).- 22p.

Mouilleau Y., Lechaudel J.F., 1999. Guide des méthodes d'évaluation des effets d'une explosion de gaz à l'air libre. INERIS.- 166p.

Pierini, T., 2015. Transport de gaz de pétrole liquéfié (GPL). Environnement-Sécurité| Sécurité et gestion des risques. Techniques de l'ingénieur, réf: SE8120, 10 juillet 2015.

Shield, S.R., 1993. A model to predict the radiant heat transfer and blast hazards from LPG BLEVEs. AIChE Symposium Series, vol. 89.

CHAPITRE III

COMPLEXITÉ D'UN SYSTÈME ET APPROCHE SYSTÉMIQUE

INTRODUCTION 61
1. COMPLEXITÉ ET SYSTÈME COMPLEXE 61
1.1. Histoire de la complexité 62
1.2. Système complexe 63
1.3. Propriétés de la complexité 64
2. APPROCHE SYSTÉMIQUE : CONCEPTS ET OUTILS 66
2.1. Concept « Système » 66
2.2. La pensée Systémique 66
2.3. L'approche Systémique 67
2.4. Les grands concepts de la systémique 67
2.4.1. L'interaction 67
2.4.2. La globalité 68
2.4.3. L'organisation 68
2.4.4. La complexité 68
2.5. Les étapes de la démarche systémique 68
2.5.1. Analyse de système ou exploration systémique 69
2.5.2. Modélisation qualitative 69
2.5.3. Modélisation dynamique ou simulation 69
3. MODÉLISATION SYSTÉMIQUE 69
3.1. Modèle et Modélisation 70
3.3. Différents types de modèles 71
3.3. Méthodes de modélisation 72
3.3.1. Dynamique des systèmes 73
3.3.2. Modèles Analytiques 74
3.3.3. SADT/FIS 74
3.3.4. Langage UML 74
3.4. Choix de la méthode de modélisation 75
4. MAINTENANCE COMME ÉTANT UN SYSTÈME COMPLEXE 76
5. CONCLUSION 77
BIBLIOGRAPHIE 77

INTRODUCTION

La maintenance a reconnu une série de changements au cours de ces dernières années. Elle est devenue une fonction essentielle, et elle est considérée comme une source de productivité. Généralement, le but principal de la maintenance est d'assurer la disponibilité et la fiabilité des équipements de production afin de maintenir un niveau satisfaisant du service de production qui exige nécessairement un jugement pour un temps donné à intervenir.

En effet, la maintenance est considérée aujourd'hui comme une fonction essentielle dans les activités de l'industrie. Elle continue à évoluer et à changer au fil du temps. Cependant, elle n'est plus une tâche simple effectuée par un opérateur ; mais elle est comptée comme un système, et elle est devenue actuellement une tâche complexe qui implique plusieurs composantes interactives (Grusenmyer, 2005).

Pour Edgar Morin, dont les travaux concernent le paradigme de complexité et le développement de la pensée complexe, la complexité peut être reconnue comme étant « *l'incertitude au sein de systèmes richement organisés* » (Morin, 2005, p. 49).

Pour étudier la complexité d'un système, il doit être modélisé. Un modèle est toute représentation physique, mathématique ou logique simplifié d'un système, d'une entité, d'un phénomène ou d'un processus. Les modèles sont des outils scientifiques utilisés quand il est impossible ou peu pratique pour créer des conditions expérimentales où les résultats peuvent être mesurés directement. Les modèles sont utilisés pour décrire certains aspects des objets ou des phénomènes afin de représenter la réalité.

Ce chapitre sera consacré à mieux expliquer la complexité, un système complexe et leurs propriétés. Ensuite, nous allons présenter l'approche systémique qui permet de mieux comprendre et qui sert à modéliser cette complexité. Après, nous allons aborder la modélisation systémique permettant de citer les différents types de modèle existants et ses méthodes. Enfin, nous allons démontrer que la maintenance est une activité complexe qui nécessite une modélisation pour mieux la comprendre.

1. COMPLEXITÉ ET SYSTÈME COMPLEXE

La complexité est une propriété des systèmes, qui rend compte de la difficulté de leur compréhension et de leur maîtrise. Daniel Durand souligne sur l'importance de ne pas confondre les deux termes complexité et complication. Un système est dit « *compliqué* » lorsqu'il possède un nombre important d'éléments qui rendent difficile sa compréhension totale, mais ce grand nombre peut produire un fonctionnement simple, stable, répétitif et facile à comprendre seulement avec l'approche analytique. Généralement, un système compliqué possède des causalités linéaires avec moins d'interaction et faible application à son environnement. Alors qu'un système est dit « *complexe* » lorsque sa compréhension globale ne permet pas d'en déduire une connaissance assurée de sa dynamique : des phénomènes d'émergence, de changement structurel, de délais affectent ce type de systèmes, pour lesquels l'identification de causalités est un enjeu fort.

Le tableau suivant montre une comparaison entre un système compliqué et un système complexe :

TABLEAU III. 1. COMPARAISON ENTRE UN SYSTÈME COMPLIQUÉ ET UN SYSTÈME COMPLEXE.

Système complexe	Système compliqué
Un ensemble de chose qui semblent liées.	Un ensemble de chose vu séparément
Pas simple	Un ensemble de chose simple
Difficile de décrire le fonctionnement, la structure ou d'en trouver la finalité.	Nous avons les capacités pour trouver la solution.
Difficile à comprendre	Facile à comprendre
Doit être modélisé et simuler pour construire sa compréhension.	**Doit être simplifié pour découvrir son explication.**

La complexité est reconnue de plus en plus comme une caractéristique essentielle du monde dans lequel nous vivons et nous percevons (Lewis *et al.*, 2014). Des exemples de systèmes dits complexes généralement cités dans la littérature sont : l'internet omniprésent, les groupes d'insectes, l'économie, le cerveau humain, les réseaux de distribution d'électricité, les réseaux de transport, etc. Une nouvelle forme de la science a vu le jour pour faire face à de tels systèmes (Gutiérrez, 2012). Comprendre un système complexe se fait en le modélisant et le simulant. Pour ce faire, l'approche de modélisation à base d'agent (ABM) semble être la meilleure réponse aux besoins de la théorie de la complexité (Arthur, 2015).

1.1. Histoire de la complexité

Suite à des travaux dans diverses disciplines, la théorie des systèmes complexes n'a pas de base réelle de texte. C'est un point de convergence de diverses données de recherche de la biologie, la cybernétique, l'écologie et de l'économie (Lorrenza, 2013).

Aux états Unis, l'Institut de Technologie de Massachusetts (MIT) a été le terrain le plus fertile de la théorie des systèmes complexes depuis 1940 (Soulat, 1940), à travers les travaux de plusieurs chercheurs comprenant:

- Heinz Von Foerster et J. Von Neumann, qui ont travaillé au début sur les problèmes de l'auto-organisation avant la formulation de leur fameuse théorie des jeux ;
- J.W. Forrester, père de la modélisation économétrique de l'économie, qui a travaillé sur la théorie des systèmes cybernétiques.

Depuis sa fondation en 1984, l'Institut de Santa Fe (SFI) a mis l'accent sur la création d'un nouveau type de communauté de recherche scientifique basée sur la science de la complexité, et le soutien à la science émergente en fournissant des attributions pluridisciplinaires significatives, physique, biologique et informatique sociale. Plusieurx scientifiques ont contribué à l'étude des systèmes complexes, parmi eux nous citons les travaux de Murray Gell-Mann (1994) et John Henry Holland (1992) qui sont présentés dans (Chan, 2001).

1.2. Système complexe

Il n'y a pas de définition exacte des systèmes complexes, mais généralement il y a un consensus sur les propriétés communes de ces systèmes. Une analyse de la littérature en relation avec les sciences de la complexité montrent que les caractéristiques sont limitées à cinq concepts que nous trouvons dans la définition donnée par Weaver (1948), Simon (1962), qui sont:

- Le système est composé d'agents en interaction;
- Leur comportement émergent ne résulte pas de l'existence d'un contrôleur central;
- Les propriétés du système émergent de l'interaction de ses composants;
- Le système peut montrer un comportement imprévisible ou conduire à une explosion incontrôlée (par exemple tremblement de terre ou un marché boursier se bloque);
- Petit changement dans les causes peut impliquer des effets dramatiques.

En effet, un « système complexe » est défini comme étant un système qui se compose d'un grand nombre d'entités hétérogènes et des interactions créant une structure collective et une organisation (Ladyman *et al.,* 2013). Ces interactions et interdépendances sont difficiles à décrire, comprendre, prévoir, gérer, développer et / ou à changer (Leveson, 2004; Sheard, 2006).

Un système est considéré comme complexe lorsque ses composantes (humaines, techniques, économiques, sociaux, etc.) et les interactions entre eux sont multiples; et aussi quand les comportements dynamiques sont divers (Sterman, 2000). En outre, la complexité résulte de l'imprévisibilité du comportement du système due aux interactions entre ses composants.

La principale caractéristique d'un système complexe est sa causalité circulaire ou réciproque, ce qui se traduit par l'existence d'un comportement rétroactif collectif et par les propriétés d'émergences dans les éléments de comportement. Dans un système complexe, connaître les propriétés et le comportement des éléments individuels ne suffit pas pour prédire le comportement global du système (Lesne, 2011).

Par conséquent, la complexité d'un système réside dans l'émergence induite par les interactions rétroactives. Dans la dynamique du système, ces interactions permettent de mettre en œuvre les mécanismes de l'adaptation de son (système) et l'évolution par rapport aux changements de son environnement.

L'étude faite par Newman (Newman, 2011) montre la théorie des systèmes complexes et ses littératures qui sont présentées dans le tableau suivant (Tableau III.2):

TABLEAU III. 2. LITTÉRATURES DE LA THÉORIE DES SYSTÈMES COMPLEXES (REFORMULÉ PAR Naciri and Tkiouat, 2015b).

Théorie des systèmes complexes	Littératures
Treillis et réseaux	Strogatz 2001; Watts 2003; Boccaletti et al. 2006 ; Cohen et al. 2010; Newman 2010
Systèmes Dynamiques	Strogatz 1994 ; Peitgen et al 2004; Arenas et al. 2008, Barrat et al. 2008
Dynamiques discrets et automates cellulaires	Gardner 1970; May 1976; Feigenbaum 1978; Langton 1986; Dennett 1998; Ilachinski 2001; Wolfram 2002
Mise à l'échelle et criticité	Simon 1955a ; Bak et al 1987 ; Drossel and Schwabl 1992 ; Bak 1996; West et al 1997; Carlson and Doyle 1999; Mitzenmacher 2004; West and Brown 2004; Newman 2005
Adaptation et théorie de jeu	Koza *et al.,* 1992; Smith 1993; Mitchell 1996; Davis 1997 ; Myerson 1997; Challet and Zhang 1997; Gould 2002; Dawkins 2006; Axelrod 2006; Watson 2007; Gintis 2009
Théorie de l'information	Shannon 1948; Pierce 1982; Bennett 1990, Cover and Thomas 1991; Badii and Politi, 1997
Complexité computationnelle	Garey et al. 1979; Aaronson 2005; Moore et al. 2011
Modélisation à base d'agent	Schelling 1971; Ray et al. 1991; Palmer et al. 1994, Epstein and Axtell 1996; Berry et al. 2002; Macy and Willer 2002, Grimm and Railsback 2005; Gilbert 2007; Page et al. 2008

La théorie des systèmes complexes a été appliquée dans divers domaines. Le tableau III.3 synthétise les différentes applications avec les principales références :

TABLEAU III. 3. LES APPLICATIONS DE LA THÉORIE DES SYSTÈMES COMPLEXES.

Applications	Références principales
Systèmes physiques	Anderson 1972; Sethna 2006; Sander 2009
Écosystèmes et évolution biologique	May 1972 ; Kauffman et al 1987 ; Kauffman 1995 ; Levin 1998 ; Holling 2001 ; Solé et al. 2002 ; Nowak 2006
Sociétés humaines	Jacobs 1961; Wasserman et al. 1994; Scott 2000; Watts et al. 2004 ; Batty 2007; Bettencourt et al. 2007; Batty 2008; Bettencourt et al. 2010
Economie et marchés	Mandelbrot 2006; Jackson 2008; Easley et al. 2010
Formation de motifs et le mouvement collectif	Turing 1952; Nagel et al. 1992; Vicsek et al. 1995; D. Helbing 1997; Winfree 2000; Ballerini et al. 2008
Ingénierie industrielle	Chaigneau 2011; Aiguier et al.2014 ;
Risques et catastrophes	OECD 2003; Khlebopros et al. 2007; OECD 2011; Nathanael et al. 2011
Linguistique appliquée	Larsen et al. 2008
Finance et Finance Islamique	Al-Suwailem 2012; Naciri and Tkiouat 2015b

1.3. Propriétés de la complexité

La complexité regroupe différentes propriétés ou caractéristiques qui peuvent être observées dans certains systèmes (Zwirn, 2006):

- Auto-organisation: la capacité d'un système complexe à changer son organisation sans influence causale de son environnement. Il est le mécanisme responsable de l'émergence. Il est le processus par lequel l'effet collectif des interactions locales entre les entités du système forment une structure ordonnée et un comportement du global (Parrott, 2002). L'auto-organisation peut également être expliquée comme une collaboration entre les entités du système qui modifient leur structure interne afin d'améliorer la viabilité et l'efficacité de l'ensemble du système (Manson, 2001);

- Emergence: se réfère à l'apparition inattendue des configurations spatiales et temporelles dans la dynamique et de la structure du système (Parrott, 2002). L'émergence est déterminée par l'interaction d'un système. En effet, le comportement global d'un système complexe ne peut pas être compris par la simple somme des comportements individuels de ses entités constitutives;

- Coévolution: avec la coévolution, les éléments d'un système peuvent changer en fonction de leurs interactions entre eux et avec l'environnement. En outre, les modèles de comportement peuvent changer au fil du temps (Chan, 2001).

- Non-linéarité: les relations entre ces entités sont souvent non linéaires. Autrement dit, ils ne peuvent pas être exprimés par un facteur de proportionnalité simple. L'évolution du système a entraîné une très forte sensibilité aux conditions initiales. Une légère perturbation dans l'état initial du système peut le diverger en dehors de son chemin habituel.
- Imprévisibilité: la raison pour laquelle l'évolution ne peut pas être prédit ou contrôlé comme il aurait aimé la science déterministe traditionnelle est la nature imprévisible des systèmes complexes (Parrott, 2002). Généralement, la complexité suggère une forte contrainte d'imprévisibilité de la dynamique ou d'évolution du système considéré (Donnadieu and Karsky, 2002). L'imprévisibilité peut être réduite par la prise en compte d'éléments initialement exclus dans la connaissance du système considéré, qui agissent dans des relations causales fortes avec les éléments initialement retenus.
- Quantité et diversité de ses composantes: systèmes complexes ont un grand nombre de composants hétérogènes qui sont identifiables dans les interactions.
- Connectivité: comme indiqué auparavant, la complexité résulte de l'interrelation, l'interaction et l'inter-connectivité des éléments au sein d'un système et entre un système et son environnement. Cela implique qu'une décision ou une mesure prise par une partie à l'intérieur d'un système influencera toutes les autres pièces connexes mais pas d'une manière uniforme.

D'autres éléments que caractérisent la complexité, selon Donnadieu et Karsky (2002) :

- Le flou et l'imprécision que la personne confronte et qui tente de déterminer la constitution, les dimensions et les frontières de l'objet à étudier ;

- L'aléa et l'instabilité du système ;
- L'ambigüité liée aux comportements du système est incompréhensible ;
- L'apparition continue d'une nouvelle configuration qui rend le système complexe instable.

Une des méthodes qui permet d'appréhender au mieux la complexité des systèmes est l'approche systémique.

2. APPROCHE SYSTÉMIQUE : CONCEPTS ET OUTILS

La systémique représente une approche spécifiquement adaptée pour tenter de comprendre le comportement d'un système complexe (Marguin, 2002 ; Karsky, 2004) afin de le modéliser et de l'analyser afin d'acquérir des connaissances pour pouvoir agir.

2.1. Concept « Système »

Le mot « Système » signifie « *assemblage* » d'après sa racine grecque du verbe *systeô*, désignant l'action d'attacher des éléments ensemble. Selon (Le Gallou, 1993), un système est « Un ensemble, formant une unité cohérente et autonome, d'objets réels ou conceptuels (éléments matériels, individus, actions, etc.) organisés en fonction d'un but (ou un ensemble de buts objectifs, finalités, projets, etc.) au moyen d'un jeu de relations (interrelations mutuelles, interactions dynamiques, etc.), le tout immergé dans un environnement ». Selon (De Rosnay, 1975) « Un ensemble d'éléments en interaction dynamique, organisé en fonction d'un but ». D'après ces définitions, nous considérons qu'un système est un ensemble d'éléments en interaction, dont les relations de causalité sont identifiées comme plus intenses ou rétroactives qu'avec les éléments de son environnement.

2.2. La pensée Systémique

La naissance de la pensée systémique est intrinsèquement liée à l'émergence, d'une réflexion autour de la notion de **complexité** (Cambien, 2007). Cette naissance était dans les débuts des années 50 aux Etats Unis, mais connue et pratiquée en France dès les années 70. La pensée systémique ouvre une voie originale et prometteuse à la recherche vue que la pensée classique a montré des insuffisances pour la prise de conscience et la compréhension de la complexité. Les limites de la pensée analytique confrontée à la complexité sont prises en considération par plusieurs chercheurs dans divers disciplines (biologie, écologie, économie, thérapies familiales, management des entreprises, urbanisme, aménagement du territoire, etc.) et qui ont montré en détail l'historique de l'apparition de la pensée systémique (Cambien, 2007; Garbolino *et al.*, 2010).

Le tableau ci-dessous (III.4) montre une comparaison entre l'approche analytique et l'approche systémique.

TABLEAU III. 4. COMPARAISON ENTRE L'APPROCHE ANALYTIQUE ET L'APPROCHE SYSTÉMIQUE (DE ROSNAY, 1975).

Approche Analytique	Approche systémique
Isole	Relie
Nature des interactions	Effets des interactions
Précision des détails	Perception globale
Une variable à la fois	Groupe de variables
Réversibilité des phénomènes	Durée et irréversibilité des phénomènes
Validation par preuve expérimentale	Validation par modélisation et simulation
Modèles précis et détaillés	Modèles globaux
Efficacité en situation d'interactions linéaires et faibles	Efficace en situation d'interactions non linéaires et fortes
Enseignement par discipline	Enseignement pluridisciplinaire
Programmation détaillée de l'action	Action par objectifs
Connaissances des détails	Connaissance des buts

La pensée systémique permet donc d'analyser des phénomènes complexes dont les comportements des composants reliés entre eux sont orientés dans un but ou une direction (Bertalanffy, 1956).

2.3. L'approche Systémique

L'approche systémique est définie selon (AFSCET, 2003) comme étant « une discipline qui regroupe les démarches théoriques, pratiques et méthodologiques, relatives à l'étude de ce qui est reconnu comme trop complexe pour pouvoir être abordé de façon réductionniste, et qui pose des problèmes de frontières, de relations internes et externes, de structure, de lois ou de propriétés émergentes caractérisant le système comme tel, ou des problèmes de mode d'observation, de représentation, de modélisation ou de simulation d'une totalité complexe ».

La systémique correspond donc à une démarche qui propose de construire et de formaliser la connaissance scientifique sous la forme de systèmes, dont la représentation et l'étude s'élaborent par la modélisation. Elle a pour ambition de dépasser les limites de la démarche analytique. Elle privilégie la relation, la dynamique et le niveau global.

2.4. Les grands concepts de la systémique

L'approche systémique s'appuie sur quatre concepts majeurs qui sont : l'interaction, la globalité, l'organisation et la complexité.

2.4.1. L'interaction

L'interaction est un concept qui porte sur la causalité dans un système. On dit que les éléments sont en interaction, c'est-à-dire qu'ils exercent chacune une action ou des actions sur d'autres éléments et reçoivent chacun une action ou des actions d'autres éléments qu'on

la nomme rétroaction ou feed-back (Garbolino *et al.*, 2010). C'est le mécanisme qui renvoie à l'entrée du système, les résultats d'une action qui dépendent de la sortie.

2.4.2. La globalité

La globalité reflète la propriété que « *le Tout est plus que la somme des parties* » et selon laquelle on ne peut les connaître sans les considérer dans leur ensemble. Cette globalité exprime à la fois l'interdépendance des éléments du système et la cohérence de l'ensemble.

2.4.3. L'organisation

L'organisation prend en considération à la fois la structure et le fonctionnement d'un système. Ce dernier cherche à assurer les fonctions et les processus qui le caractérisent. Ces fonctions et processus sont différenciés de telle sorte que les éléments qui le rendent effectifs constituent la structure du système. L'organisation cherche à accomplir un but fixé.

2.4.4. La complexité

Comme il a été expliqué précédemment, la complexité est la raison principale de l'apparition de l'approche systémique. Sans complexité, le rationalisme analytique pouvait se montrer suffisant pour appréhender le monde et la science. Dans les travaux de Edgar Morin, qui sont liés au paradigme de complexité et au développement de la pensée complexe, la complexité est reconnue comme étant « *l'incertitude au sein de systèmes richement organisés* » (Morin, 1990; 2005).

2.5. Les étapes de la démarche systémique

La démarche systémique est constituée de trois étapes qu'elles sont définies dans les travaux de Donnadieu et Karsky (2002) (Fig.III.1) :

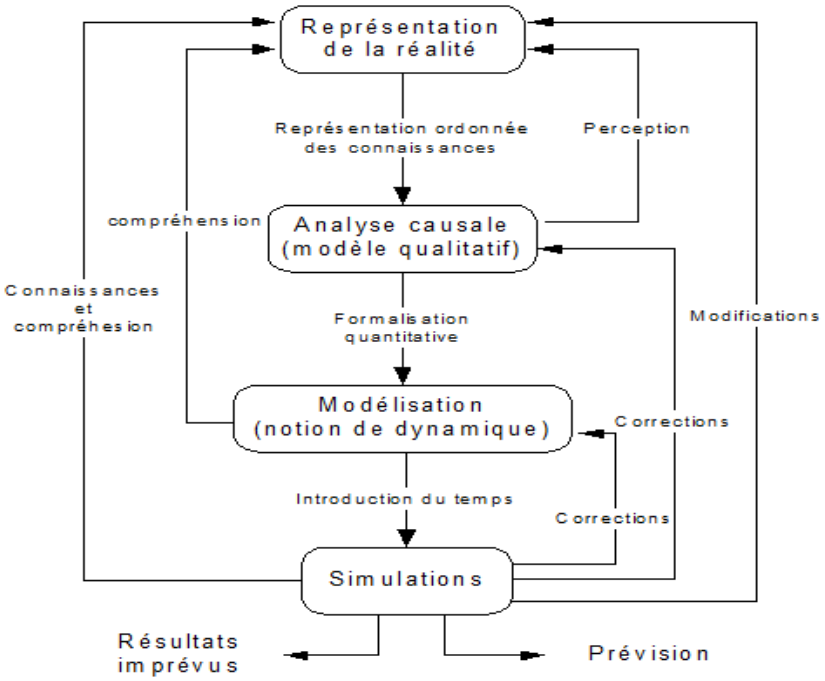


Figure III. 1. Démarche de construction d'un modèle de simulation (Donnadieu et Karsky, 2002).

2.5.1. Analyse de système ou exploration systémique

Cette étape permet d'avoir une première connaissance du système étudié, de le délimiter et de le situer dans son environnement. Elle cherche à dégager les éléments les plus importants et les interactions entre ces éléments, d'identifier les variables de flux et les variables d'état, les boucles de rétroaction ainsi que leur polarité et les délais éventuels.

2.5.2. Modélisation qualitative

Cette étape permet de construire une représentation qui met en évidence la structure et le fonctionnement du système, en ajoutant les interactions entre les principaux composants, les flux et les actions de pilotage pour le réguler. Cette configuration, sous la forme d'un schéma ou diagramme sur lequel apparaissent les éléments formant le système, est relativement normalisée. Malgré l'importance de la phase de construction du modèle qualitatif dans le processus de connaissance d'un système mais le modèle obtenu ne fait pas l'objet de simulation et ne possède aucune valeur prédictive.

2.5.3. Modélisation dynamique ou simulation

Cette étape cherche à rendre simulable ou opérable le modèle établi précédemment. La modélisation dynamique introduit la notion de temps pour l'observation des évolutions possibles du système et ce à travers les simulations.

La simulation se caractérise par la réalisation et l'étude des scénarios pour prospecter et analyser les résultats imprévus, permettant de tester le modèle et de mettre en évidence les comportements imprévus. Cette étape a pour objectif d'anticiper les évolutions futures du système et de modifier la structure destinée à générer les comportements désirés.

3. MODÉLISATION SYSTÉMIQUE

La modélisation d'un système consiste à construire un modèle qui représente le système réel par simplification de ses propriétés structures et fonctionnelles.

Les modèles analytiques permettent d'obtenir des résultats (sorties) à partir des entrées en fournissant un modèle d'équations avec un grand nombre de paramètres. Divers add-ons permettent d'effectuer des variations de paramètres comme Monte Carlo, ou des expériences d'optimisation. Cependant, les modèles analytiques souffrent de plusieurs problèmes tels que leur incapacité à représenter différents niveaux entre micro / macro; et il n'y a pas de représentation du comportement. En outre, ils ne peuvent pas expliquer l'émergence de structures spatiales / temporelles; et ils ne reflètent pas les influences non-intuitives entre les variables avec un grand nombre de paramètres. Enfin, ils ne prennent pas compte du temps et des dépendances causales (Braha and Reich, 2003). D'où l'apparition de la modélisation systémique.

La modélisation systémique est une démarche représentant le système réel, qui quand elle est associée à la simulation, fournit un outil d'aide à la décision qui tient compte de la dynamique

du système et du comportement de ses composants, et qui formalise la structure, l'organisation et les caractéristiques du système réel.

La démarche systémique vise, donc, à organiser les connaissances aux niveaux de la modélisation pour réduire la complexité dans le but de permettre une meilleure compréhension et une analyse plus efficace. Son objet est d'élaborer un système de représentation qui permet d'appréhender les situations complexes de façon appropriée.

3.1. Modèle et Modélisation

Modéliser est d'abord un processus technique qui permet de représenter, dans un but de connaissance et d'action, un objet ou une situation voire un événement réputé complexe. Elle est utilisable dans tous les domaines scientifiques concernés par la complexité.

Pour étudier la complexité d'un système, il doit être modélisé. Un modèle est toute représentation physique, mathématique ou logique simplifié d'un système, d'une entité, d'un phénomène ou d'un processus. Selon Naslin (1974 in Le Moigne, 1977) « *un modèle d'un phénomène ou d'un processus est essentiellement un mode de représentation tel qu'il permette, d'une part, de rendre compte de toutes les observations faites et, d'autre part, de prévoir le comportement du système considéré dans des conditions plus variées que celles qui ont donné naissance aux observations* ». Dans les travaux de Treuil *et al. (*2008), les auteurs ont défini un modèle comme étant « *une construction abstraite qui permet de comprendre le fonctionnement d'un système de référence en répondant à une question qui le concerne. Représentation simplifiée de ce système, un modèle s'appuie sur une théorie générale et il est exprimé dans un langage spécifique appelé langage de modélisation* ».

Les modèles sont des outils scientifiques utilisés quand il est impossible ou peu pratique pour créer des conditions expérimentales où les résultats peuvent être mesurés directement. Les modèles sont utilisés pour décrire certains aspects des objets ou des phénomènes sans prétendre de représenter la réalité. Un modèle peut être obtenu de différentes manières soit par équations mathématiques, soit par règles procédurales ou encore par processus graphiques.

Deux phases essentielles pour la construction du modèle : la première appelée la modélisation statique consiste à définir une représentation de la structure d'un système de référence sans allusion à son évolution dans le temps, et la deuxième phase est la modélisation dynamique que présente le dynamisme du modèle statique en intégrant dans la représentation des hypothèses ou des règles concernant l'évolution dans le temps du système.

La modélisation est un moyen de résoudre les problèmes du monde réel. Dans de nombreux cas, il est difficile de se permettre l'expérience avec des objets réels pour trouver les bonnes solutions: construction, déconstruction, et faire des changements peuvent être trop coûteux, dangereux, ou tout simplement impossible. Par conséquent, il est convenu de construire un modèle qui utilise un langage de modélisation pour représenter le système réel et de trouver le chemin du problème à sa solution à travers un monde sans risque où il est permis de faire

des erreurs, défaire les choses, revenir en arrière dans le temps et recommencer (Braha and Reich, 2003; Braha *et al.,* 2006; Grigoriev, 2015).

Toutefois, si le modélisateur souhaite que son modèle soit opératoire, c'est-à-dire permette à l'utilisateur de s'orienter dans la complexité et d'agir efficacement sur elle, il doit prendre en compte certains critères et respecter certaines lois de construction.

3.2. Différents types de modèles

Une réalité donnée peut conduire à un grand nombre de modèles différents qui dépendent des problèmes à résoudre, mais aussi de l'utilisation que l'on souhaite faire du modèle, de la méthode de modélisation utilisée et aussi de modélisateur (Claver, 1997).

Selon l'utilisation de modélisation, trois types de langages de modélisation sont distingués (Lamine, 2001) : modèle informel, modèle formel et modèle semi-formel.

Le modèle informel, appelé ausssi modèle mental, est « *une forme de représentation analogique de la connaissance »* (Borer and Benetos, 2005). Il est fondé sur la mémoire des personnes et présente une manière usuelle et familière de communication entre les personnes. L'utilisation du modèle informel peut rendre la modélisation imprécise et parfois flou (Fraser *et al.,* 1994).

Les modèles formels utilisent les concepts mathématiques et informatiques, et ils ont une syntaxe et une sémantique bien définie. Ils sont plus explicites que les modèles mentaux et donc peuvent être communiqué sans ambiguïté. Les modèles formels peuvent s'inscrire dans une approche prospectiviste ou dans une approche de prévision. L'approche prospective est une vision globale, déterministe, qualitative, volontariste et multiple qui se caractérise par l'élaboration d'un modèle auquel on applique des scénarii testés par informatique. Dans ce cas, le futur est la raison d'être et d'agir au présent, et il est multiple et non probabilisé. A l'opposé, la prévision est une vision quantitative et stochastique (Frery, 1992). Elle s'utilise dans le cas d'un phénomène quantifiable. Les variables dans l'approche de prévision sont donc quantitatives, objectives et connues. L'événement de futur est unique et probabilisé. Les modèles de prévision sont plutôt des modèles probabilistes et quantitatifs.

Les modèles semi-formels sont généralement des représentations graphiques normalisées avec une syntaxe précise. Ce type de modèle montre son efficacité surtout dans la construction des modèles de compréhension.

Daniel Durand (2006) reconnaît quatre grandes catégories de modèles selon leur utilisation :

- Le modèle cognitif: est une représentation simplifiée du système dans l'objectif d'exposer l'état de la connaissance du système étudié. Les modèles cognitifs utilisent des représentations graphiques et des formes analogiques telles que des symboles.
- Le modèle décisionnel: est un outil d'aide à la décision établi dans une perspective d'optimisation. Les modèles décisionnels cherchent à représenter les conséquences selon la décision prise par une simulation.

- Le modèle normatif : porte sur l'établissement de valeurs à suivre, à conserver ou à atteindre selon l'état du système modélisé. C'est un modèle qui porte particulièrement sur les systèmes anthropiques et artificiels, techniques. Un modèle normatif peut alors porter seulement sur la structure du système ou sur son fonctionnement. Les modèles normatifs peuvent correspondre à des projets d'organisation ou de gestion d'une activité économique, typiquement une entreprise.

- Le modèle prévisionnel : permet de produire des informations qui indiquent l'état du système modélisé dans un temps futur ou dans des conditions différentes de celles considérées comme normales ou habituelles. La conception du modèle prévisionnel s'établie sur une représentation de la dynamique du système, sur un temps passé et présent considéré comme pertinent. A partir de cette représentation de la structure et du fonctionnement passé du système, le modèle permet d'obtenir des résultats de l'état du système selon des scénarios qui contraignent la dynamique, offrant ainsi une appréhension de la sensibilité du système considéré. Les modèles prévisionnels se traduisent par des programmes informatiques de plus en plus sophistiqués.

Les ordinateurs s'avèrent des outils de modélisation puissants, ils offrent un monde virtuel souple où on pourrait créer presque tout imaginable. Il existe plusieurs types de modèles informatiques, à partir des feuilles de calcul de base qui permettent à quiconque de modéliser les dépenses à des outils de modélisation et de simulation complexes qui aident les utilisateurs expérimentés à explorer des systèmes dynamiques.

Le tableau suivant englobe les différents types de modèles:

TABLEAU III. 5. LES DIFFÉRENTS TYPES DE MODÈLES (CHAPURLAT, 2007; ALOUI, 2007).

Types de modèle	Modèle Cognitif	Modèle Normatif		Modèle prédictif ou prospectif	
		Modèle Prospectif	Modèle Constructif	Modèle Formel	Modèle analytique
Usages des modèles	- Analyser, comprendre, identifier l'environnement. - Explorer, simuler, valider les concepts organisationnels.	- Formaliser le problème et les besoins ; - Prescrire les exigences.	Construire les architectures fonctionnelles et physiques.	Prévoir, valider, simuler, prouver des comportements	Estimer les performances, la fiabilité et la sûreté de fonctionnement.
Objectifs du modèle	- Fournir une représentation d'un système existant qui mette en évidence les propriétés intéressantes de ce système.	Fournir une représentation d'un système à créer mettant en relief les propriétés souhaitées de ce système.		Déduire le comportement d'un système dans des situations nouvelles à partir des connaissances que l'on a de son état.	

3.3. Méthodes de modélisation

Pour procéder au developpement de la modélisation, il existe plusieurs méthodes de modélisation. Chacune de ces méthodes a des avantages et des limites.

Parmi ces méthodes : la dynamique des systèmes, les modèles analytiques, SADT/FIS, le langage UML, et l'approche Multi-Agents (qui sera abordé dans le chapitre V).

3.3.1. Dynamique des systèmes

La dynamique des systèmes est définie par son concepteur J.W. Forrester (1961), ingénieur électronicien, comme étant un « *mode d'étude du comportement des systèmes industriels permettant de montrer comment des politiques, des décisions, des structures et des délais sont en interrelation pour influencer la croissance et la stabilité* ». Il s'est développé au début des années 60, sur la base d'un ouvrage « Industrial dynamics ».

La dynamique des systèmes propose d'étudier, de modéliser et de simuler les phénomènes qui réalisent un changement ou une conservation dans un système naturel ou artificiel, au travers du temps. Les modèles appréhendant la dynamique des systèmes se fondent sur les concepts d'interaction, de rétroaction et de complexité.

La construction d'une modélisation en dynamique des systèmes repose sur cinq étapes majeures :

- Choisir les variables qui décrivent l'état (stock) des éléments du système en interaction, à chaque instant ;
- Définir les hypothèses qui établissent les interactions en vue de la formalisation du système envisagé, qui permettent de le distinguer de son environnement ;
- Elaborer un modèle de relations causales entre les variables, par les connaissances et hypothèses, en distinguant les boucles de rétroactions ;
- Désagréger les phénomènes de causalité afin d'appréhender la complexité à un niveau jugé pertinent pour en attendre de possibles conséquence sur l'évolution dynamique ;
- Ecrire les relations établies sous la forme d'équations différentielles dans un cadre informatique qui permette les simulations.

Les éléments que constitue le modèle de la dynamique de systèmes sont :

- Les variables d'état (stock) : symbolisées par un rectangle. Ils fonctionnent comme des accumulateurs et ils représentent des stocks dont la quantité varie à travers le temps en fonction des flux d'entrée et de sortie qui les alimentent et les vident.
- Les flux transitent par le réservoir et en modifient l'état. Ils déterminent les variations dans les différents niveaux du système. Les vannes contrôlent les débits des différents flux. Chaque vanne peut être considérée comme centre de décision, recevant des informations et les transforment en actions.
- Les variables auxiliaires : représentées par un cercle, apparaissent dans le canal d'information. Elles peuvent être une constante, une fonction tabulée en fonction du temps t, ou d'une variable quelconque. Elles sont très utiles pour intégrer de l'information qualitative et des délais dans les modèles.
- Le canal d'information: permet de connecter les variables du système entre elles et de simuler les rétroactions.

3.3.2. Modèles Analytiques

Les modèles analytiques sont des modèles mathématiques fondés sur des équations mathématiques afin de résoudre les problèmes quantitativement. L'approche analytique décrit les entités du système et leurs relations à l'aide d'une fonction d'analyse mathématique. L'exécution d'un tel modèle est considéré comme une évaluation des entités et des relations. Les modèles analytiques se subdivisent en deux parties : les modèles déterministes où tous les paramètres sont connus et les modèles probabilistes où les paramètres sont aléatoires.

3.3.3. SADT/FIS

La SADT (Structured Analysis and Design Technic) : Technique structuré d'analyse et de modélisation, est une méthode d'analyse fonctionnelle descendante mise en œuvre par la société Softech aux Etats-Unis, en 1977 et introduite en Europe à partir de 1982 par Michel Galiner. SADT est destinée à la modélisation des décisions et des activités d'une organisation ou d'un système (Karagiannis, 2010). Le but de la SADT est d'offrir une vision globale et synthétique du système automatisé en ne retenant qu'un petit nombre d'informations jugé essentiel à la compréhension sous forme de modèle graphique. Elle permet de décrire les fonctions, les relations et les flux de données d'une organisation par des boites que représente les entités ou activités et les relations entre ces boites par des flèches. La SADT permet de décomposer un système complexe en sous systèmes de façon physique et structurelle.

Dans le domaine industriel, la SADT s'applique pour décrire fonctionnellement les systèmes automatisés, ce qui facilite la communication entre spécialistes de différentes disciplines.

La méthode FIS (Fonctions-Interactions-Structure) est fondée sur l'approche SIPOC (Supplier-Input-Process-Output-Customers). Elle peut être vue comme une extension de la SADT. Elle permet de modéliser le système de point de vue des fonctions et des ressources (Flaus *et al.,* 2010). Cette méthode décrit les fonctions sous la forme de séquences et permettant la construction d'un système complexe de façon hiérarchique. L'élément de base de cette modélisation est le processus caractérisé par ses fonctions (rôle d'un ensemble de ressources exprimé en termes de finalité), ses ressources (éléments matériels, informationnels, humains et organisationnels) et ses interactions (éléments utilisés par le processus (entrée) et services fournis par le processus (sortie)) avec les autres systèmes).

3.3.4. Langage UML

Le langage UML (Unified Modelling Language) est un langage de modélisation unifié graphique normalisée par l'OMG (groupe de gestion d'objet). Il est devenu une norme de modélisation objet (Booch *et al.,* 2000). Le but de l'approche d'objet est de représenter les objets du monde réel sous forme de classes, de sous-classes et d'objets. Une classe est une abstraction du monde réel qui recueille une totalité d'objets ayant des caractéristiques et des comportements communs. Un objet est une unité de base d'une classe. Il hérite des caractéristiques de la classe à laquelle il appartient. La notation d'UML permet de modéliser un système selon une vision orientée objet. Cette modélisation est faite au travers de plusieurs diagrammes qu'UML propose. Ces diagrammes permettent de spécifier les liens statiques et

la structure du système au travers des diagrammes statiques, dynamiques et comportementaux (ces différents diagrammes de modélisation sont expliqués en détail dans le guide de notation d'UML).

Les diagrammes les plus utilisés sont :

- Diagramme cas d'utilisation : qui représente la structure des grandes fonctionnalités nécessaires aux utilisateurs du système.
- Diagramme de classe : c'est un diagramme qui montre une collection d'éléments statiques (classes), leur contenu et les relations entre eux.
- Diagramme de séquence : décrit le déroulement d'une interaction entre les objets dans le cadre de la réalisation d'un scénario de cas d'utilisation en mettant en évidence la dimension temporelle de cette interaction.
- Diagramme d'activité: représente les séquences d'opérations macroscopique et microscopique qui décrivent le comportement interne (algorithme) de chaque objet.

La première utilisation du langage UML est la modélisation des systèmes informatiques et des logiciels qui vise à construire, à visualiser, et à préciser les systèmes d'information (OMG, 2006). Actuellement, son utilisation s'étend à modéliser les autres types de systèmes. Napoli (2001) utilise le langage UML pour modéliser un système d'information des risques naturels. Boulanger *et al.,* (2003) modélisent un système de chemin de fer en utilisant UML afin d'étudier sa fiabilité. Dans Refsdal et Stolen (2008), un diagramme de séquence UML est utilisé pour modéliser le comportement des acteurs dans une situation de prise de décision. Gabbar et al. (2001) proposent un design pour le modèle de sécurité de l'usine qui est entièrement intégré dans le modèle de cycle de vie des plantes en utilisant le langage UML. Dans (Bouloiz *et al.,* 2011), les auteurs proposent une méthode opérationnelle de l'analyse de risque en utilisant un diagramme de collaboration d'UML et du modèle MADS. Leur travail vise à intégrer le diagramme de collaboration d'UML dans le modèle MADS. Le système de la source de danger de modèle MADS a été remplacé par le diagramme de collaboration afin de définir et de modéliser les scénarios de risque. Toutefois, ce modèle présente deux limites. D'une part, il ne présente qu'un cadre d'analyse qualitatif des risques. Il ne prend pas en compte l'aspect quantitatif du risque. D'autre part, ce modèle ne tient pas compte la traçabilité des accidents passés.

En effet, le manque d'une base de données affaiblit souvent les évaluations d'un accident passé, empêche une meilleure connaissance des faits et ne facilite pas la prise de décision dans des accidents similaires.

Les points forts du langage UML : il s'agit d'un support de communication performant qui permet de cadrer l'analyse, de faciliter la compréhension de représentations abstraites complexes. Son caractère polyvalent et sa souplesse en font un langage largement diffusé.

3.4. Choix de la méthode de modélisation

Le choix de la méthode de modélisation dans cette recherche porte sur la capacité à décrire le système, ses fonctions et ses ressources, le fait d'apparaître les liens inter processus, la

description de façon schématique le déroulement du processus et sur un langage répandu et normalisé (Flaus *et al.,* 2010).

La dynamique des systèmes est un outil générique d'analyse des phénomènes et des organisations. Toutefois, cette approche n'est pas adaptée pour étudier le comportement des individus (Lachtar *et al.,* 2012). Alors que les modèles analytiques ne montrent pas le dynamisme du système ni son évolution avec le temps.

Quant à la méthode SADT fournit une représentation graphique des fonctions, sans prévoir l'assemblage des fonctions ayant des attributs en communs, ni l'attribution d'une ressource à plusieurs fonctions (Flaus *et al.,* 2010 ; Karagiannis, 2010 ; Lachtar *et al.,* 2012). La méthode FIS fait apparaître les aspects structurels et fonctionnels mais elle n'est pas conçue pour l'analyse des comportements dynamiques des acteurs ni l'évolution du système dans le temps.

Le choix de l'outil de modélisation pour la représentation du monde réel afin d'étudier le comportement des acteurs s'est porté sur le langage UML. Divers diagrammes d'UML permettant d'avoir une vision globale sur le système étudié, en montrant les différentes interactions entre les éléments que constitue le système par les diagrammes de classe, ainsi que leur chronologie dans le temps grâce au diagramme de séquence. C'est un langage largement répondu et normalisé, et constitue un moyen d'échange privilégié entre les parties qui maitrisent le logiciel (Faucher *et al.,* 2008).

4. MAINTENANCE COMME ÉTANT UN SYSTÈME COMPLEXE

La tâche de maintenance n'est pas une simple tâche effectuée par un opérateur mais une tâche complexe et sa complexité réside dans :

- **L'auto-organisation** de service de maintenance en dépit de service de production et de la direction de l'entreprise ;
- **Les interactions** qui existent entre les opérateurs, les équipements, l'organisation et l'environnement du travail qui se dénote par l'intervention et **l'émergence** de plusieurs acteurs dans le fonctionnement du système;
- **L'intégration** des différents éléments que constitue la fonction maintenance pour atteindre un objectif commun;
- **La coévolution** qui se manifeste dans:
  - ✓ L'âge (usure) et la diversité des états d'un système (Etat normal, état dégradé, état défaillant);
  - ✓ La durée des tâches de maintenance qui peut être variée et non planifiée ;
  - ✓ L'incertitude et l'apprentissage liés au fonctionnement du facteur humain ;

- ✓ La disponibilité ou non des ressources et les perturbations que les managers doivent gérer.

- **L'hétérogénéité** des tâches de maintenance, c'est-à-dire que les tâches ne sont pas similaires, chaque tâche de maintenance nécessite une procédure (nécessittant des ressources, des outils, des pièces de rechanges, etc.) différente par rapport aux autres.

- **L'imprévisibilité** qui se montre dans la nature urgente de certaines tâches de maintenance.

5. CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons expliqué davantage le terme de complexité et nous avons montré par la suite la complexité de la tâche de maintenance.

La systémique a représenté une approche spécifiquement adaptée pour tenter de comprendre le comportement d'un système complexe afin de le modéliser et de l'analyser dans le but d'acquérir des connaissances pour pouvoir agir. Une vue générale sur la modélisation, les types de modèles et les méthodes de modélisation ont été présenté au cours de ce chapitre. Après, nous avons justifié le choix de la méthode de modélisation qui a été porté sur le langage UML vue sa pertinence et sa performance dans les divers diagrammes que le langage UML fournis.

Le chapitre suivant présente un modèle conceptuel qui se base sur le langage UML pour l'analyse et l'évaluation des risques des activités de maintenance.

BIBLIOGRAPHIE

Aaronson, S., 2005. NP-complete problems in physical reality. ACMSIGACT News 36 (1), 30–52 (2005).

AFSCET, Donnadieu, G., Durand, D., Neel, D., Nunez, E., Saint-Paul, L., 2003. L'Approche systémique: de quoi s'agit-il ? Synthèse des travaux du Groupe AFSCET, " Diffusion de la pensée systémique".

Aiguier, M. 2014. Boulanger, F., Krob, D., Marchal, C., 2014. Complex Systems Design and Management/ Springer International Publishing Switzerland, 2014.

Aloui, S., 2007. Thèse: Contribution à la modélisation et l'analyse du risque dans une organisation de santé au moyen d'une approche système, l'Ecole des Mines de Paris.

Al-Suwailem, S., 2012. Complexity and endogenous instability. Res. Int. Business Finance (2012). Elsevier.

Anderson, P. W., 1972. More is different. Science 177, 393–396 (1972).

Arenas, A., DiazGuilera, A., Kurths, J., Moreno, Y., Zhou, C., 2008. Synchronization in complex networks. Physics Reports 469, 93–153 (2008).

Arthur, W. B., 2015. Complexity and the Economy. Oxford University Press 2015.

Axelrod, R., 2006. The Evolution of Cooperation. (Basic Books, New York, 2006).

Badii, R., Politi, A., 1997. Complexity: Hierarchical Structure and Scaling in Physics", (Cambridge University Press, Cambridge, 1997).

Bak, P., Tang, C., Wiesenfeld, K., 1987. Self-organized criticality: An explanation of the 1/f noise. Phys. Rev. Lett. 59, 381–384 (1987).

Bak, P., 1996. How Nature Works: The Science of Self-Organized Criticality. (Copernicus, New York, 1996).

Ballerini, M., Cabibbo, N., Candelier, R., Cavagna, A., Cisbani, E., Giardina, I., Orlandi, A., Parisi, G., Procaccini, A., Viale, M., Zdravkovic, V., 2008. Empirical investigation of starling flocks: A benchmark study in collective animal behavior, Animal Behavior 76, 201–215 (2008).

Barrat, A., Barthelemy, M., Espignani, A., 2008. Dynamical Processes on Complex Networks, (Cambridge University Press, Cambridge, 2008).

Batty, M., 2007. Cities and complexity, (MIT Press, Cambridge, MA, 2007).

Batty, M., 2008. The size, scale, and shape of cities, Science 319, 769–771 (2008).

Bennett, C. H., 1990. How to define complexity in physics, and why, (editor), Complexity, Entropy, and the Physics of Information," pp. 443–454 (Addison-Wesley, Reading, MA, 1990).

Berry, B., Kiel, J. L., L. D., Elliott, E., 2002. Adaptive agents, intelligence, and emergent human organization: Capturing complexity through agent-based modeling, Vol. 99, Suppl.3 of Proc. Natl. Acad. Sci. USA (2002).

Bertalanffy, V. L., 1968. General systems theory, foundation, development, applications. New York, USA.

Bettencourt, L. M. A., Lobo, J., Helbing, D., Kuhnert, C., West, G. B., 2007. Growth, innovation, scaling, and the pace of life in cities, Proc. Natl. Acad. Sci. USA 104,

7301–7306 (2007).

Bettencourt, L. M. A., West, G. B., 2010. A unified theory of urban living, Nature 467, 912–913 (2010).

Boccaletti, S., Latora, V., Moreno, Y., Chavez, M., Hwang, D.-U., 2006. Complex networks: Structure and dynamics, Physics Reports 424, 175–308 (2006)

Booch, G., Rumbaugh, J., Jacobson, I., 2000. The unified software development process. New York, USA: Adisson-Wesley.

Borer, R., Benetos, K., 2005. Construction of a mental model: cognitivism glossary of terms.

Boulanger, J. L., Bon, P., Mariano, G., 2003. Semi formal modeling and formal specification: UML & B in simple railway application'. ICSSEA.

Bouloiz, H., Garbolino, E., Tkiouat, M., 2011. Risk Analysis Model Using UML and MADS model. Open Journal of Safety Science and Technology, 1, 108-114.

Braha, D., Reich, Y., 2003. Topological Structures for Modeling Complex Engineering Design Processes. Research in Engineering Design, 14 (4), pp. 185-199.

Braha, D., Bar-Yam, Y., A.Minai, A., 2006. Complex Engineered Systems. ISBN-13 978-3-540-32831-5 Springer Berlin Heidelberg New York.

Cambien, A., 2007. Une introduction à l'approche systémique. Les rapports d'étude, Certu, N° Production 13029 N° Produit 01.

Carlson, J. M., Doyle, J., 1999. Highly optimized tolerance: A mechanism for power laws in designed systems, Phys. Rev. E 60, 1412–1427 (1999).

Challet, D., Zhang, Y.C., 1997. Emergence of cooperation and organization in an evolutionary game," Physica A 246, 407–418 (1997).

Chaigneau, P., 2011. Control and structure in complex systems, Research paper, Université Paris7-Denis Diderot 2011

Chan, S., 2001. Complex Adaptive Systems. ESD.83 Research Seminar in Engineering Systems October 31, 2001/ November 6, 200.

Chapurlat, V., 2007. Vérification et validation de modèles de systèmes complexes: application à la Modélisation d'Entreprise, Université Montpellier II, France. HdR.

Claver J.-F., Gélimier J., Pitt D., 1997. Flow management enterprises, modelling and simulation, Hermes Editions.

Cohen, R., Havlin, S., 2010. Complex Networks: Structure, Stability and Function, (Cambridge University Press, Cambridge, 2010).

Cover, T. M., Thomas, J. A., 1991. Elements of Information. Theory, (John Wiley, New York, 1991).

Davis, M. D., 1997. Game Theory: A Nontechnical Introduction", (Dover, New York, 1997).

Dawkins, R., 2006. The Selfish Gene (Oxford University Press, Oxford, 2006).

Dennett, D. C., Brainchildren: Essays on Designing Minds, (MIT Press, Cambridge, MA, 1998).

De Rosnay, J., 1975. Le Macroscope, Vers une Vision Globale. Le Seuil.

Donnadieu, G., Karsky, M., 2002, La systémique, penser et agir dans la complexité. Paris : Editions de liaisons.

Drossel, B., Schwabl, F., 1992. Self-organized critical forest-fire model, Phys. Rev. Lett. 69, 1629–1632 (1992).

Durand, D., 2006. La systémique. Editions PUF, Collection Que sais-je ? 127 p.

Easley, D., Kleinberg, J., 2010. Networks, Crowds, and Markets, (Cambridge University Press, Cambridge, 2010).

Epstein, J. M., Axtell, R. L., 1996. Growing Artificial Societies: Social Science from the Bot-tom Up", (MIT Press, Cambridge, MA, 1996).

Faucher, C., Bertrand, F., Lafaye, J-Y., 2008. Génération d'ontologie à partir d'un modèle métier UML annoté, publié dans "RNTI 12 (2008) 65--84", Soumis le : Vendredi 26 Février 2010.

Feigenbaum, M., 1978. Quantitative universality for a class of non-linear transformations," J. Stat. Phys. 19, 25–52 (1978).

Flaus, J.M., Berthelier, E., Giannoccaro, F., 2010. Modélisation de systèmes organisationnels pour l'analyse des défaillances: application au plan de sauvegarde communal. 8ème Conférence Internationale de Modélisation et SIMulation - OSIM'10 - 10 au 12 mai 2010 - Hammamet - Tunisie « Evaluation et optimisation des systèmes innovants de production de biens et de services ».

Fraser, M. D., Kumar, K., Vaishnavi, V. K., 1994. Strategies for incorporating formal specifications in software development. Communications of the ACM, Vol. 37, n10, pp. 74–84.

Frery, F., 1992. Small epistemology of systemic chaos, labor ESCP Paper No. 93/114, "Expert System and strategies of power", No. 89-99.

Gabbar, H. A., Suzuki, K., Shimada, Y., 2001. Design of plant Safety Model in Plant Enterprise Engineering Environment. Journal of Reliability Engineering and System Safety, Vol. 73, No. 1, pp. 35-47.

Garbolino, E., Chéry, J-P., Guarnieri, F., 2010. Modélisation dynamique des systèmes industriels à risques. Sciences du Risque et du Danger (SRD). Série Notes de synthèse et de recherche.

Gardner, M., 1970. Mathematical Games: The fantastic combinations of John Conway's new solitaire game life, Scientific American 223, 120–123 (1970).

Garey, M. R., Johnson, D. S., 1979. Computers and Intractability: A Guide to the Theory of NP-Completeness, (W. H. Freeman, San Francisco, 1979).

Gell-Mann, M., 1994. The Quark and the Jaguar: Adventures in the Simple and the Complex. New York 1994.

Gilbert, N., 2007. Agent-Based Models, (Sage Publications, London, 2007).

Gintis, H., 2009. The Bounds of Reason: Game Theory and the Unification of the Behavioral Sciences, (Princeton University Press, Princeton, NJ, 2009).

Gould, S. J., 2002. The Structure of Evolutionary Theory", (Belknap Press, Cambridge, MA, 2002).

Grigoryev, I., 2015. AnyLogic 7 in three days: A quick course in simulation modeling. ISBN-13: 978-1508933748.

Grimm, V., Railsback, S. F., 2005. Individual-based Modeling and Ecology (Princeton University Press, Princeton, NJ, 2005).

Grusenmyer, C., 2005. Accidents related to maintenance: Literature review. Scientific and Technical notes INRS 248, Vandoeuvre, 68p.

Gutiérrez, T.N., 2012. Une architecture de contrôle des systèmes complexes basée sur la simulation multi-agent. Thèse présentée et soutenue publiquement le pour l'obtention du Doctorat de l'Université de Lorraine.

Helbing, D., 1997. Traffic and related self-driven many-particle systems, Rev. Mod. Phys. 73, 1067–1141 (1997).

Holland, J.H., 1992. Complex Adaptive Systems Daedalus, MIT Press, 1992, Vol 121, pages 17-30.

Holling, C. S., 2001. Understanding the complexity of economic, ecological, and social systems, Ecosystems 4, 390–405 (2001).

Ilachinski, A., 2001. Cellular Automata: A Discrete Universe, (World Scientific, Singapore, 2001)

Jackson, M. O., 2008. Social and Economic Networks, (Princeton University Press, Princeton, 2008).

Jacobs, J., 1961. The Death and Life of Great American Cities, (Random House, New York, 1961).

Karagiannis, G-M., 2010. Thèse: Méthodologie pour l'analyse de robustesse des plans de secours industriels.

Karsky, M., 2004. La dynamique des systèmes complexes ou la systémique de l'ingénieur, référence AG1565.

Kauffman, S. A., 1995. At Home in the Universe, (Oxford University Press, Oxford, 1995).

Khlebopros, R., Okhonin, V., Fet, A., 2007. Catastrophes in nature and society, mathematical modeling of complex system.

Koza, J. R., Keane, M. A., Streeter, M. J., 1992. Evolving inventions," Scientific American 288 (2), 52–59 (1992).

Lachtar, D., Garbolino, E., 2012. Performance Assessment of Crisis Management Plans with the Contribution of multi-agent Systems. AIDIC, Chemical Engineering Transactions, Vol 26, pp. 447-270.

Lamine, E., 2001. Définition d'un modèle de propriété et proposition d'un langage de spécification associé : LUSP, Université Montpellier II. PhD.

Langton, C. G., 1986. "Studying artificial life with cellular automata," C. G. Langton, Physica D 22, 120–149 (1986).

Larsen, D., Cameron, F. L., 2008. Complex Systems and Applied Linguistics. Oxford University Press 2008.

Ladyman, J., Lambert, J., Wiesner, K., 2013. What is a Complex System?. European Journal for Philosophy of Science 3: 33–67. doi:10.1007/s13194-012-0056-8.

Le Gallou, F., 1993. Systémique: Théorie et applications. Editions Tec Et Doc.

Le Moigne, J.L., 1977. La théorie du système général. Editions PUF, Collection Systèmes-Décisions.- 258 p.

Lesne, A., 2011. Complexity of life. 2011.

Leverson, N., 2004. A new accident model for engineering safer systems. Safety Science 42, 237-270.

Levin, S. A., 1998. Ecosystems and the biosphere as complex adaptive systems. Ecosystems 1, 431–436 (1998).

Lewis, F. L., Zhang H., Hengster-Movric, K., Das, A., 2014. Cooperative Control of Multi Agent Systems. Optimal Design and Adaptive Approaches / Chapter 1: Introduction to Physics and Synchronization in Nature and Cooperative Control for Multi-Agent Systems on Graphs. Springer-Verlag London 2014.

Lorenza, S., Zucker, J.D., 2013. Abstraction in Artificial Intelligence and Complex Systems. Springer Science + Business Media New York 2013.

Macy, M. W., Willer, R., 2002. From factors to actors: Computational sociology and agent based modeling, Annual Review of Sociology 28, 143–166 (2002).

Mandelbrot, B. B., 2006. The Misbehavior of Markets: A Fractal View of Financial Turbulence, (Basic Books, New York, 2006).

Manson, S. M., 2001. Simplifying Complexity: A Review of Complexity Theory. Geoforum, No. 32, pp. 405-414, 2001.

Marguin, J., 2002. Approche systémique des crises et aide à la décision stratégique, Revue l'Armement, N°77, p155-161.

May, R. M., 1972. Will a large complex system be stable?, Nature 238, 413–414 (1972).

May, R. M., 1976. Simple mathematical models with very complicated dynamics, Nature 261, 459–467 (1976).

Mitchell, M., 1996. Introduction to Genetic Algorithms", (MIT Press, Cambridge, MA, 1996).

Mitzenmacher, M., A brief history of generative models for power law and lognormal distributions," Internet Mathematics 1, 226– 251 (2004).

Moore, C., Mertens, S., 2011. The Nature of Computation", (Oxford University Press, Oxford, 2011).

Morin, E., 1990. Introduction à la pensée complexe, Paris : ESF. 158p. ISBN: 2710108003, 9782710108009.

Morin, E., 2005. Introduction à la pensée complexe. Editions du Seuil, collection Points.- 158p.ISBN: 2020668378, 9782020668378.

Myerson, R. B., 1997. Game Theory: Analysis of Conflict, (Harvard University Press, Cambridge, MA, 1997).

Naciri, N., Tkiouat, M., 2015b. Complex system theory development. International Journal of Latest Research in Science and Technology, Vol.4, Issue 6, pp. 93-103.

Nagel, Schreckenberg, M., 1992. A cellular automaton model for freeway traffic, K., J. Phys. I France 2, 2221–2229 (1992).

Nathanaël Friant, Soetewey, S., Marc Demeuse, M., Hourez, J., et Wijsen, J., 2011. Le système éducatif : un système complexe que l'on peut modéliser. La magazine de l'universite de mons : élément mars 2011.

Napoli, A., 2001. Formalisation of knowledge and modelling language contribution: application using the modeling of the behaviour of forest fires. Catalog Mines Paris-Tech.

Newman, M. E. J., 2005. Power laws, Pareto distributions and Zipf's law. Contemporary Physics 46, 323–351 (2005).

Newman, M. E. J., 2010. Networks: An Introduction, (Oxford University Press, Oxford, 2010).

Newman, M. E. J, 2011. Complex Systems: A Survey. Am. J. Phys. 79, 800-810 (2011).

Nowak, M. A., 2006. Evolutionary Dynamics: Exploring the Equations of Life, (Belknap Press, Cambridge, MA, 2006).

OECD: Emerging risks in the 21st century an agenda for action.

OECD: Future Global Shocks, improving risk governance. Reviews of Risk. Management Policies

OMG, Object Management Group, 2006. UML 2.1 Superstructure Specification. Document: ptc/06-04-02.

Page, S. E., Blume, L., Durlauf, S., 2008. Agent based models, The New Palgrave Encyclopedia of Economics, (Palgrave Macmillan, Basingstoke, 2008), 2nd edition.

Palmer, R. G., Arthur, W. B., Holland, J. H., LeBaron, B., Tayler, P., 1994. Artificial economic life: a simple model of a stock market, Physica D 75, 264–274 (1994).

Parrott, L., 2002. Complexity and the Limits of Ecological Engineering, Transactions of the ASAE, No. 45, pp. 1697-1702, 2002.

Peitgen, H.O., Jurgens, H., Saupen, D., 2004. Chaos and Fractals, (Springer, Berlin, 2004).

Pierce, J. R., 1980. An Introduction to Information Theory, (Dover,New York, 1980), 2nd edition.

Ray, T. S., in Langton, C., Taylor, C., Farmer, J. D., Rasmussen, S., 1991. An approach to the synthesis of life: Artificial Life II, volume XI of Santa Fe Institute Studies in the Sciences of Complexity, pp. 371–408 (Addison-Wesley, Redwood City, CA, 1991).

Refsdal, A.. Stolen, K., 2008. Extending UML Sequence Diagrams to Model Trust Dependent Behaviour with the Aim to Support Risk Analysis. Journal of Electronic Notes in Theoretical Computer Science, Vol. 197, No. 2, pp. 15-29.

Sander, L. M., 2009. Advanced Condensed Matter Physics, (Cambridge University Press, Cambridge, 2009).

Schelling, T., 1971. Dynamic models of segregation, J. Math. Soc.1, 143–186 (1971).

Scott, J., 2000.Social Network Analysis: A Handbook, (Sage, London, 2000), 2nd edition.

Sethna, J. P., 2006. Statistical Mechanics: Entropy, Order Parameters and Complexity, (Oxford University Press, Oxford, 2006).

Simon, H. A., 1955.On a class of skew distribution functions. Biometrika 42, 425–440 (1955).

Simon, H., 1962. The architecture of complexity. Proceedings of the American Society Phylosophical.1962.

Shannon, C. E., 1948. A mathematical theory of communication, Bell System Technical Journal 27, 379–423 (1948).

Sheard, S., 2006. Complex Systems Science and its Effects on Systems Engineering, European Systems Engineering Conference, Edinburgh, UK, 18-20 September 2006.

Smith, J., Maynard, 1993. The Theory of Evolution, (Cambridge University Press, Cambridge, 1993), 3rd edition.

Solé, R., Goodwin, B., 2002. Signs of Life: How Complexity Pervades Biology, (Basic Books, New York, 2002).

Soulat, J., 1994.Theory of complex systems and financial instability. Universite de Paris I Pantheon-Sorbonne 1994.

Sterman, J.D., 2000. Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World with CD-ROM" New York: McGraw-Hill/Irwin.

Strogatz, S. H., 1994.Nonlinear Dynamics and Chaos (AddisonWesley, Reading, MA, 1994).

Strogatz, S. H., 2001. Exploring complex networks. Nature 410, 268–276 (2001).

Treuil, J.P, Drogoul, A., Zucker, J.D., 2008. Modélisation et simulation à base d'agents: exemples commentés, outils informatiques et questions théoriques. Dunod.

Turing, A. M., 1952. The chemical basis of morphogenesis," Phil. Trans. R. Soc. London B 237 (37-72) (1952).

Vicsek, T., Czirok, A., Ben-Jacob, E., Cohen, I., Shochet, O., 1995. Novel type of phase transition in a system of self-driven particles, Phys. Rev. Lett. 75, 1226–1229 (1995).

Wasserman, S., Faust, K., 1994. Social Network Analysis, (Cambridge University Press, Cambridge, 1994).

Watts, D. J., 2003. Six Degrees: The Science of a Connected Age". (Norton, New York, 2003).

Watts, D. J., 2004. The new science of networks, Annual Review of Sociology 30, 243–270.

Watson, J., 2007. Strategy: An Introduction to Game Theory, (Norton, New York, 2007).

Weaver, W., 1948. Science and complexity, in American Scientist, 36: 536-544. 1948

West, G. B., Brown, J. H., Enquist, B. J., 1997. A general model for the origin of allometric scaling laws in biology, Science 276, 122–126 (1997).

West, G. B., Brown, J. H., 2004. Life's universal scaling laws, Physics Today 57 (9), 36–42 (2004).
Winfree, A. T., 2000. The Geometry of Biological Time, (Springer, New-York, 2000), 2nd edition.
Wolfram, S., 2002. A New Kind of Science, (Wolfram Media, Champaign, IL, 2002).
Zwirn, H.P., 2006. Les systèmes complexes. Mathématiques et biologie, Paris, Editions Odile Jacob.- 219 p.

CHAPITRE IV

MODÈLE CONCEPTUEL POUR L'ANALYSE ET L'ÉVALUATION DES RISQUES DES ACTIVITÉS DE MAINTENANCE

INTRODUCTION 84
1. ANALYSE DES RISQUES INDUSTRIELS 84
1.1. Définitions et concepts 84
1.1.1. Risque (Risk) 84
1.1.2. Sécurité (Safety) 84
1.1.3. Sûreté de fonctionnement (Dependability) 85
1.1.4. Différentes Notions 85
1.2. Analyse des risques dans le processus de management des risques 86
1.2.1. Management des risques 86
1.2.2. Analyse des risques 87
1.2.3. Evaluation des risques 87
1.2.4. Maîtrise des risques 88
2. MÉTHODES D'ANALYSE DES RISQUES ET LEURS LIMITES 88
2.1. Classification des méthodes d'Analyse des risques 88
2.2. Panorama des méthodes d'analyse des risques et leurs évolutions 89
2.3. Limites des méthodes d'analyse des risques dans la maintenance 93
3. MODÈLE CONCEPTUEL POUR L'ANALYSE ET L'ÉVALUATION DES RISQUES DES ACTIVITÉS DE MAINTENANCE 95
3.1. Identification et modélisation du système 97
3.2. Identification des dangers et les principaux scénarios d'accidents 98
3.3. Quantification des risques 99
4. CONCLUSION 103
BIBLIOGRAPHIE 102

INTRODUCTION

Depuis plusieurs décennies, la sûreté de fonctionnement et plus spécialement la sécurité sont devenues des enjeux majeurs à la survie des entreprises. Cette prise en compte se base principalement sur le concept de risque.

Dans ce chapitre nous allons définir les différents concepts associés au risque et à la sécurité. Ensuite, nous allons distinguer entre le management de risque, l'analyse de risque et l'évaluation de risque. Après, nous allons présenter les méthodes d'analyse de risque et leurs limites dans les activités de maintenance. À la fin, nous allons proposer une nouvelle méthode d'analyse de risque qui implique le caractère complexe des travaux de maintenance et des interactions entre ses composants. Cette méthode est basée sur la combinaison du langage UML et la méthode MOSAR permettant par la suite de créer une base de données pour l'apprentissage d'un accident.

1. ANALYSE DES RISQUES INDUSTRIELS

1.1. Définitions et concepts

1.1.1. Risque (Risk)

Le risque est un concept moderne (Flanagan and Norman, 1993) diversement compris, représenté, identifié, estimé, interprété, perçu, évalué, maîtrisé et géré. Il constitue aujourd'hui un thème central dans les sociétés (Veyret *et al.*, 2004).

Le terme « risque » est couramment utilisé de nos jours, et il a plusieurs définitions. Dans le dictionnaire (Larousse, 2005) le risque est défini comme une possibilité, probabilité d'un fait, d'un événement considéré comme mal ou un dommage. Danger, inconvénient plus au moins probable auquel on est exposé : courir le risque.

La norme OHSAS (BSI OHSAS 18001, 2005) précise que le risque est une combinaison de la probabilité et de la (les) conséquence(s) de la survenue d'un événement dangereux spécifié.

Le risque donc est une propriété intrinsèque à toute prise de décision. Il est la combinaison de deux éléments: la probabilité d'occurrence d'un événement ou d'une combinaison d'événements conduisant à une situation dangereuse, ou la fréquence de tels événements, et les conséquences de cette situation dangereuse.

La définition du risque introduit le concept de danger qui correspond à la propriété intrinsèque d'une substance ou d'une disposition entraînant un dommage.

1.1.2. Sécurité (Safety)

Selon (Larousse, 2005), la sécurité est une situation dans laquelle quelqu'un, quelque chose n'est exposé à aucun danger ; à aucun risque, en particulier d'agression physique, d'accidents, de vol; de détérioration: Cette installation présente une sécurité totale. Alors que (CEI 50 (191), 1990) a défini la sécurité comme étant l'aptitude d'une entité à éviter, dans

des conditions données, des événements critiques ou catastrophiques. Quant à (ISO/CEI Guide 51, 1999) a spécifié la sécurité comme absence de risque inacceptable.

D'après ces définitions, la sécurité donc est l'absence de dommage ou de conditions susceptibles de créer un risque inacceptable. C'est l'ensemble de mesure ou de dispositions prises pour réduire voire éviter les risques.

1.1.3. Sûreté de fonctionnement (Dependability)

Selon la norme NF X 60-010, la sûreté de fonctionnement est l'ensemble des aptitudes d'un bien qui lui permettent de remplir sa fonction, au moment voulu, pendant la durée prévue, sans dommage pour lui-même et son environnement. Une autre définition a été spécifié par (ISO/CEI Guide 51, 1999) comme étant la sûreté de fonctionnement est la science des défaillances. Elle recouvre les concepts de fiabilité, disponibilité, maintenabilité et de sécurité.

La sûreté de fonctionnement est donc un ensemble de moyens (démarches, méthodes, outils, etc.…) qui a pour but la maitrise des risques. Selon Heurtel (Heurtel, 2003), la sûreté de fonctionnement se définit comme une activité d'ingénierie qualitative et quantitative, une riche palette de méthodes et de concepts au service de la maîtrise des risques.

1.1.4. Différentes Notions

Les notions de différents concepts qui caractérisent le processus d'apparition d'un dommage sont présentées dans le tableau suivant :

TABLEAU IV. 1. DÉFINITIONS DES NOTIONS DE DANGER, DOMMAGE, PHÉNOMÈNE DANGEREUX ET ACCIDENT.

Notion	Source	Définition
Danger	BSI OHSAS 18001, 2005	Situation, condition ou pratique qui comporte en elle-même un potentiel à causer des dommages aux personnes, aux biens ou à l'environnement. Une source ou une situation pouvant nuire par blessure ou atteinte à la santé, dommage à la propriété, à l'environnement du lieu de travail ou une combinaison de ces éléments.
Phénomène dangereux	ISO 14971, 2000	Source potentielle de dommage.
Dommage	ISO/CEI Guide 51, 1999	Blessure physique ou une atteinte à la santé des personnes ou dégât causé aux biens ou à l'environnement.
Accident	OHSAS 18001	Evénement imprévu entraînant la mort, une détérioration de la santé, des lésions, des dommages ou autres pertes.

1.2. Analyse des risques dans le processus de management des risques

Le management des risques est un processus intégrant plusieurs activités importantes pour la sécurité. En effet, une confusion se fait entre ces termes : Analyse des Risques, Evaluation des risques et Management des risques.

- *Analyse des risques (Risk Analysis):* Est un processus scientifique qui permet d'identifier les risques à l'aide d'un ensemble de méthodes, de techniques et d'outils, et d'estimer ces risques en termes qualitatifs et /ou quantitatifs (DNV, 1995).
- *Evaluation des risques (Risk Assessment):* Est un élément de système qui se compose de l'analyse des risques et l'évaluation des risques (RSSG, 1992 ; IEC, 1995). C'est le processus de comparaison des risques estimés avec les critères d'évaluation des risques établis afin de déterminer le niveau ou l'importance des risques et des stratégies de gestion des risques appropriées, en fournissant des recommandations pour les décideurs (CE, 1999).
- *Management des Risques (Risk Management):* Le processus global qui intègre tous les éléments.

1.2.1. Management des risques

Selon ISO/CEI Guide 73, 2002, le management des risques est un ensemble des activités coordonnées visant à diriger et piloter un organisme vis-à-vis du risque. Le management du risque inclut typiquement l'appréciation du risque, le traitement du risque, l'acceptation du risque et la communication relative au risque.

Le processus de management des risques se décompose en sept étapes principales selon (ISO, 2010) comme montré dans la figure IV.1:

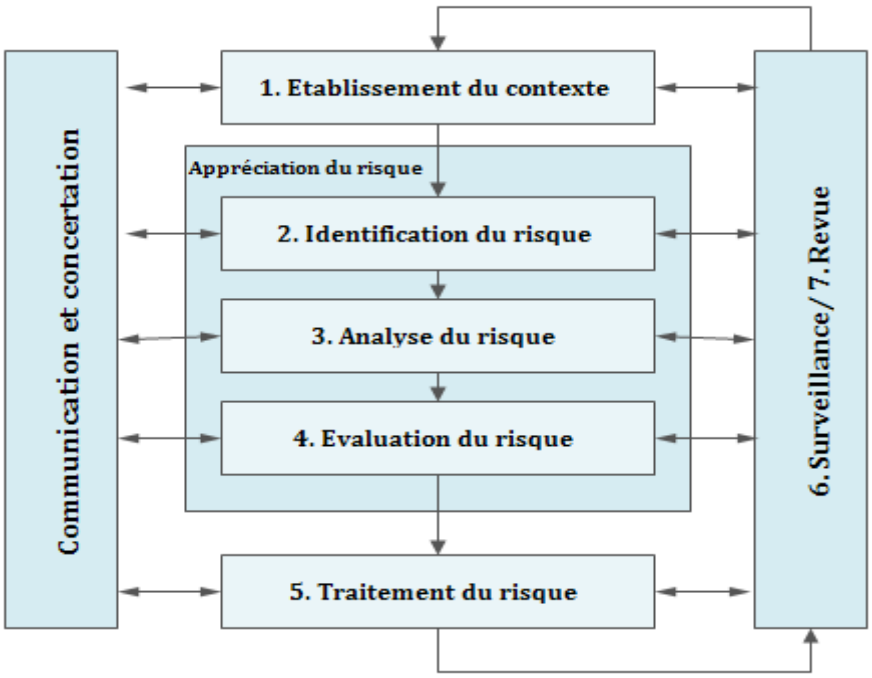


Figure IV. 1. Processus de management des risques (ISO, 2010).

- Etablissement du contexte : consiste à définir le domaine d'application, les paramètres externes et internes à prendre en considération et les critères de risque ;
- Identification des risques : consiste en un processus de recherche, de reconnaissance et de description des risques auxquels est soumis le système considéré ;
- Analyse des risques : correspond au processus mis en œuvre pour comprendre la nature d'un risque et pour déterminer le niveau associé ;
- Evaluation des risques : vise à comparer les résultats de l'analyse avec les critères de risque afin de déterminer si le risque est acceptable ou non ;
- Surveillance des risques : consiste à vérifier, superviser, observer, ou déterminer l'état du risque afin d'identifier continûment des changements par rapport au niveau de performance exigé ou attendu ;
- Revue des risques : vise à déterminer l'adaptation au risque étudié pour atteindre les objectifs établis.

Les étapes d'identification, d'analyse et d'évaluation des risques constituent la phase d'appréciation du risque. Ces trois étapes présentent le cœur du processus de management des risques vues qu'elles servent pour l'évaluation et le traitement du niveau de risque.

Afin de mener à bien le processus global de management des risques présenté dans la figure IV.1, il est important d'avoir des approches d'analyse des risques structurées permettant de représenter les systèmes et de les analyser.

1.2.2. Analyse des risques

L'analyse des risques est l'utilisation systématique d'informations pour identifier les entités sources de danger et pour estimer le risque. L'estimation d'un risque se définit comme un « *Processus utilisé pour affecter des valeurs à la probabilité et aux conséquences d'un risque. L'estimation du risque peut considérer le coût, les avantages, les préoccupations des parties prenantes, et d'autres variables requises selon le cas pour l'évaluation du risque* » (ISO/CEI Guide 73, 2002).

1.2.3. Evaluation des risques

Il s'agit d'un processus de comparaison du risque estimé avec des critères de risque donnés pour déterminer l'importance du risque. La comparaison peut être menée par rapport à un référentiel préétabli dans l'objectif de permettre la prise de décision vis-à-vis de l'acceptation du risque ou de la nécessité de son traitement. Elle peut considérer le coût, les avantages, les préoccupations des parties prenantes, et d'autres variables requises selon le cas pour l'évaluation du risque (ISO/CEI Guide 73, 2002).

L'évaluation des risques est une procédure de classification de l'acceptabilité de ces risques en fonction des fréquences d'occurrence, gravités, expositions, etc. Il faut distinguer entre le concept d'évaluation (donner une valeur) et d'estimation (donner un avis sur une valeur).

1.2.4. Maîtrise des risques

La maîtrise selon (Larousse, 2005) est la possibilité d'agir sur quelque chose; fait de le dominer techniquement, intellectuellement, scientifiquement.

C'est l'action de mise en œuvre des décisions de management du risque. La maîtrise du risque peut impliquer la surveillance, la réévaluation et la mise en conformité avec les décisions (ISO/CEI Guide 73, 2002).

La maîtrise des risques (Risk Control) est un processus conduisant à évaluer et choisir l'une des différentes possibilités de réduction ou de transfert des risques ; c'est d'une manière générale l'ensemble des actions de mise en œuvre des décisions de la gestion visant à les ramener sous le seuil d'acceptabilité.

2. MÉTHODES D'ANALYSE DES RISQUES ET LEURS LIMITES

L'analyse des risques est définie dans plusieurs références (Sadgrove, 2005; Magne and Vasseur, 2006; Desroches *et al.,* 2006; Desroches *et al.,* 2007; Garlick, 2007; Mazouni, 2008; Koivisto *et al.,* 2009).

L'objectif principal des méthodes d'analyse des risques est de réduire le risque global, qui peut entraîner comme conséquence des défaillances inattendues des systèmes d'exploitation (Khan *et al.,* 2004), et de reconnaître les événements dangereux qui pourraient conduire à une situation dangereuse ou nuire au bon déroulement du processus (panne, incidents ...).

2.1. Classification des méthodes d'Analyse des risques

Selon (Tixier *et al.,* 2002), les méthodes traditionnelles peuvent être divisées en deux groupes principaux : qualitatives et quantitatives. L'analyse quantitative du risque est effectuée par l'estimation de la fréquence et de ses conséquences. L'analyse qualitative du risque est applicable lorsque les risques sont faibles et bien connu. Chaque groupe peut être divisé en trois catégories : déterministes, probabilistes, et une combinaison des approches déterministes et probabilistes. Les méthodes déterministes prennent en considération le produit, l'équipement et la quantification des conséquences pour différentes cibles comme les personnes, l'environnement et les équipements. Cette approche suppose que l'apparition d'un danger et ses conséquences sont connues et certaines. Les méthodes probabilistes sont basées sur la probabilité ou la fréquence d'apparition de la situation dangereuse ou de la survenance d'un accident potentiel. Les méthodes probabilistes sont principalement axées sur la probabilité de défaillances sur les équipements ou les composants. Les méthodes que présente la combinaison des méthodes probabilistes et déterministes sont principalement utilisées pour examiner l'ensemble des établissements industriels.

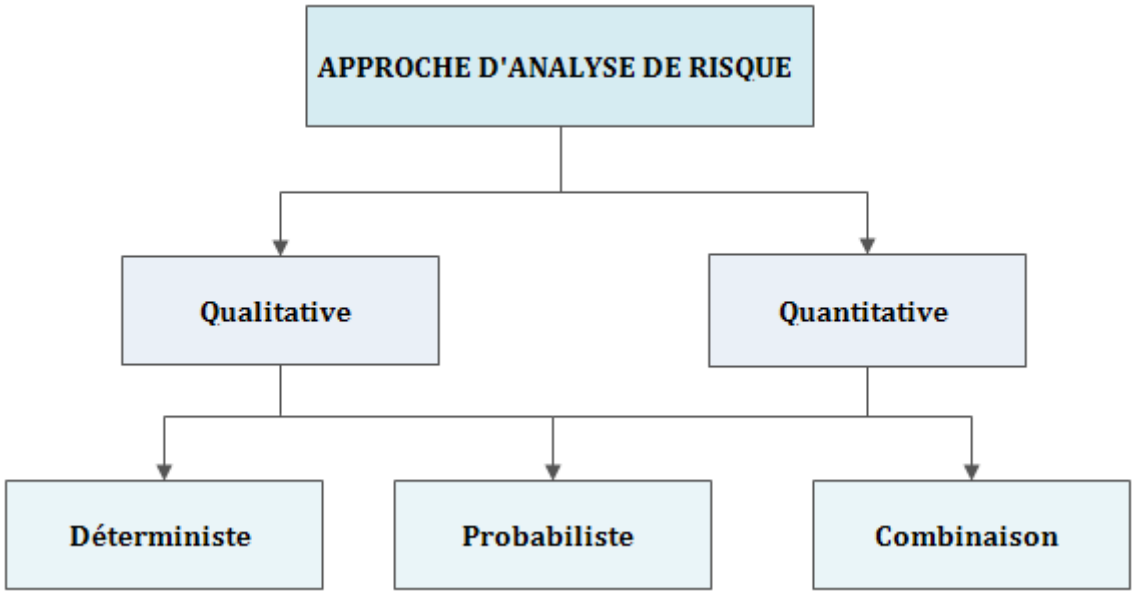


Figure IV. 2.Typologie des méthodes d'analyse des risques.

2.2. Panorama des méthodes d'analyse des risques et leurs évolutions

L'analyse des risques est une activité clé dans le processus de sécurité. Selon (CCPS, 1992; Craweley *et al.*, 1999; Rogers, 2000; Tixier *et al.*, 2002), de nombreuses méthodes ont été développées au cours des 30 dernières années pour procéder à une analyse des risques d'une installation industrielle. Parmi ces méthodes, HAZard and OPerability study-HAZOP (Rogers, 2000), Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets-AMDE (Nicolet-Monnier, 1996), Arbre de défaillance (Khan and Abbasi, 1998), Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et leurs Criticités-AMDEC (Rogers, 2000), Analyse Préliminaire des Risques-APR (Nicolet-Monnier, 1996; Rogers, 2000). Ces méthodes sont les méthodes les plus populaires dans l'analyse des risques utilisées dans la maintenance (Pintelon and Muchiri, 2009).

Les accidents de Bhopal (1984), Piper Alpha (1988) ou de Tchernobyl (1986), ont montré les limites de ces méthodes que présentent un modèle séquentiel d'accidents, et qu'elles se concentrent sur les facteurs techniques et humains dans l'analyse des risques. Le retour d'expérience de ces accidents a montré la conjonction de plusieurs facteurs techniques, humains et organisationnels dans la survenue de ces événements catastrophiques (Jasanoff, 1994, p 361; Paté-Cornell, 1999; Salge and Milling, 2006). De nombreux chercheurs se sont intéressés à prendre en compte l'aspect organisationnel dans l'analyse des risques. Leurs recherches ont abouti à l'émergence de nouveaux modèles en termes d'accidents industriels (Roberts, 1990; Perrow, 1994; Rasmussen, 1997; Reason, 1997).

Les modèles organisationnels considèrent les accidents comme le résultat d'une combinaison de plusieurs facteurs liés à des défaillances actives, ou conditions latentes (Reason, 1990). Ces modèles organisationnels forment un cadre méthodologique pour analyser les accidents industriels. Parmi ces méthodes: SAM (System-Action-Management) (Paté-Cornell and

Murphy, 1996) qui vise à étudier le rôle de l'organisation dans les séquences d'accidents, CREAM (Cognitive Reliability and Error Analysis Method) (Hollnagel, 1998) pour analyser la conduite des activités humaines en fonction de l'environnement organisationnel de travail pour des opérateurs, TRIPOD (Groeneweg *et al.,* 2002) pour détecter la présence de défaillances latentes au sein de l'organisation et de limiter leurs effets, ATHOS (Analyse Technique, Humaine et Organisationnelle de la sécurité) (le Coze *et al.,* 2002) pour vérifier que l'efficacité réelle des barrières correspond à l'efficacité attendue dans le but de démontrer que les scénarios d'accident sont gérées de manière acceptable.

Les modèles organisationnels ont démontré le concept de complexité en termes des accidents industriels. En effet, selon la théorie d'un accident normal de Charles Perrow (1994), l'accident est déterminé par la structure technique et organisationnelle du système. Un accident majeur est connu comme normale, car il est intrinsèque à la complexité des installations. La caractérisation des systèmes organisationnels par la complexité a conduit à l'émergence d'une nouvelle approche qui permet la compréhension de cette complexité, qui est l'approche systémique. Cette approche est apparue à la fin de 1960 (Bertalanffy, 1968). Elle s'est avérée être la démarche la plus appropriée pour analyser le système, pour formaliser les relations et les interactions entre les composants du système (Le Moigne, 1994). L'approche systémique permet de développer des modèles plus proches de la réalité, et donc en mesure d'appréhender la complexité du système, en formalisant les interactions entre ses composants. Le modèle systémique consiste à décrire la prestation caractéristique au niveau du système dans son ensemble, plutôt que sur le niveau de cause à effet « mécanismes » spécifiques, ou même des facteurs organisationnels (Hollnagel, 2004). Le point de vue systémique considère les accidents comme un phénomène émergent des interactions au sein du système (Leveson, 2004; Hollnagel, 2004), et non pas une séquence d'événements de cause à effets, comme indiqué par les modèles séquentiels de l'analyse des risques.

L'utilisation de l'approche systémique dans le domaine de l'analyse des risques est encore moins développée. Il convient de mentionner certains modèles systémiques connus et qui sont: l'approche MADS-MOSAR développé par Perilhon (1999), l'approche MADS-UML présentée par Bouloiz *et al.,* (2011), le modèle STAMP développé par Leveson (2004), FRAM (Functional Resonance Accident Model) développé par Hollnagel (2004).

La méthode MOSAR (se réfère à la Méthode Organisée et Systémique de l'Analyse des Risques) est une approche générique fournissant une analyse des risques du système et en même temps, d'identifier les moyens de prévention, de protection et de mesures d'atténuation nécessaires pour minimiser les risques (Perilhon, 2000). Elle est fondée sur le modèle MADS qui fait référence à la Méthode d'Analyse des Dysfonctionnements des Systèmes.

MADS (se réfère à la Méthode d'Analyse des Systèmes Dysfonctionnels) est un modèle d'analyse des risques industriels basé sur l'approche systémique (Perilhon, 2000). Ce modèle, appelé aussi l'univers de l'aléa, est construit sur la base des principes de la modélisation systémique développée par (Le Moigne, 1977). Il est composé de deux systèmes dits danger (ou risque) qui sont le système source et le système cible.

Le système source de danger peut être divisé en sous-systèmes connectés. Le modèle MADS montre que la survenance d'un événement indésirable passe par un processus d'événement. Ce processus commence à partir d'une source de danger sous forme de flux de danger et atteint une cible de risque (système cible) (Fig. IV.4). Le modèle MADS présente un vocabulaire qui met en évidence une séquence d'événements : événement déclencheur, événement initial, flux de danger et événement final.

Ce modèle (Fig. IV.3) repose sur les notions de:

- Système (s) source: système(s) à l'origine des flux de danger donc des événements non souhaités.
- Système(s) cible: système(s) sensibles(s) aux flux de danger et subissant des dommages.
- Evénement initial: événement qui caractérise le changement d'un système qui passe d'un état ou d'une situation normale à un état ou une situation défaillante.
- Evénement non souhaité: ensemble de dysfonctionnements susceptibles de provoquer des effets non souhaités sur des systèmes cibles.
- Flux de danger: vecteur du danger déclenché par l'événement initiateur.
- Evénement initiateur: qui va déclencher l'événement initial.
- Evénement renforçateur: qui accroît la vulnérabilité de la cible ou augmente les effets.

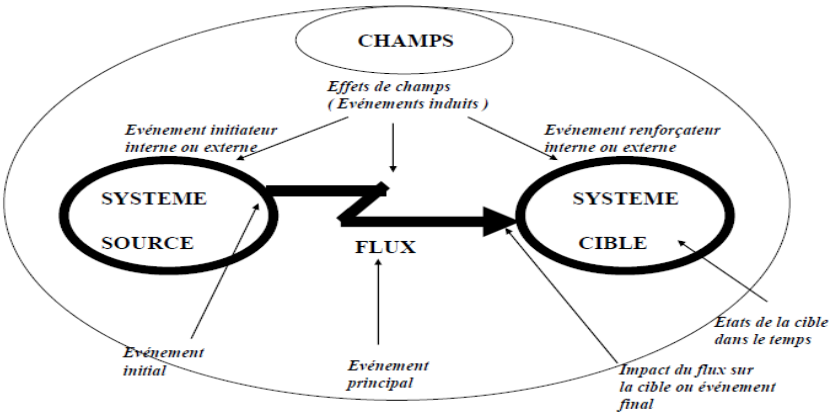


Figure IV. 3. Modèle MADS (Perilhon, 2000).

La méthode MOSAR est fondée sur le modèle MADS. C'est une approche systémique et systématique, pour évaluer, créer des hiérarchies, négocier, et gérer le risque d'un système décrit dans un contexte complexe. Son objectif est de trouver des dysfonctionnements et de gérer les risques dans un système complexe. La méthodologie propose une approche générique fournissant une analyse de risque du système et en même temps, d'identifier les moyens de prévention, de protection et de mesures d'atténuation nécessaires pour réduire et minimiser les risques (Perilhon, 2000). Cette méthode permet l'identification des sources de risque distinguant des scénarios des événements peu désirés, fournissant et évaluant l'analyse de risque et puis proposant des mesures de sécurité.

La méthode MADS / MOSAR permet d'accentuer les scénarios principaux et de définir les barrières de prévention et de protection nécessaires de mettre en place, à neutraliser ou à réduire l'occurrence de l'événement indésirable (Cherkaoui and Loupez, 2009).

La méthode MOSAR contient deux modules (A et B) pour aider le décideur en raison des choix résultants qu'il fournit (fig. IV.4). Le module A présente une analyse macroscopique qui effectue une analyse des risques du système basé sur le processus présenté sur la figure IV.4. Après avoir divisé le système en sous-ensembles, la première étape comprend l'examen des sources de dégagement les plus appropriées pour chaque sous-ensemble. On se rapporte à une grille de typologie pour les systèmes qui sont des sources de danger et puis emploie le modèle MOSAR qui les relie aux cibles. Ce processus permet de générer des scénarios d'interférence des risques entre les sous-systèmes qui sont recueillis pour le même événement. Pour chaque scénario libéré un ensemble de chaînes de conséquence sont développés montrant l'escalade des événements.

Le module A finit avec la qualification des barrières identifiées. Une barrière peut être technique et/ou organisationnelle. Une barrière technique est un dispositif de sécurité physique qui peut être déclenché manuellement ou automatiquement pour éviter l'occurrence d'un accident ou pour atténuer ses effets. C'est dans le cas d'arrêt d'urgence, des systèmes de refroidissement, des capteurs, les automates de sécurité, etc. Une barrière organisationnelle est toutes les pratiques d'action ou de commande de direction et les exigences d'organisation pour la sécurité, tels que la capitalisation de la connaissance, la mise à jour des procédures, l'analyse et l'identification des risques, l'intégration sécuritaire des opérateurs, la simulation d'accident, etc.

Le module B permet une analyse détaillée d'une partie spécifique de l'installation à effectuer et met en œuvre en particulier les outils de fiabilité pour rechercher les dysfonctionnements techniques (comme une analyse d'effet d'analyse de mode de défaut ou de mode de défaillance). Il met également en œuvre les outils de l'analyse opérationnelle pour étudier les dysfonctionnements opérationnels.

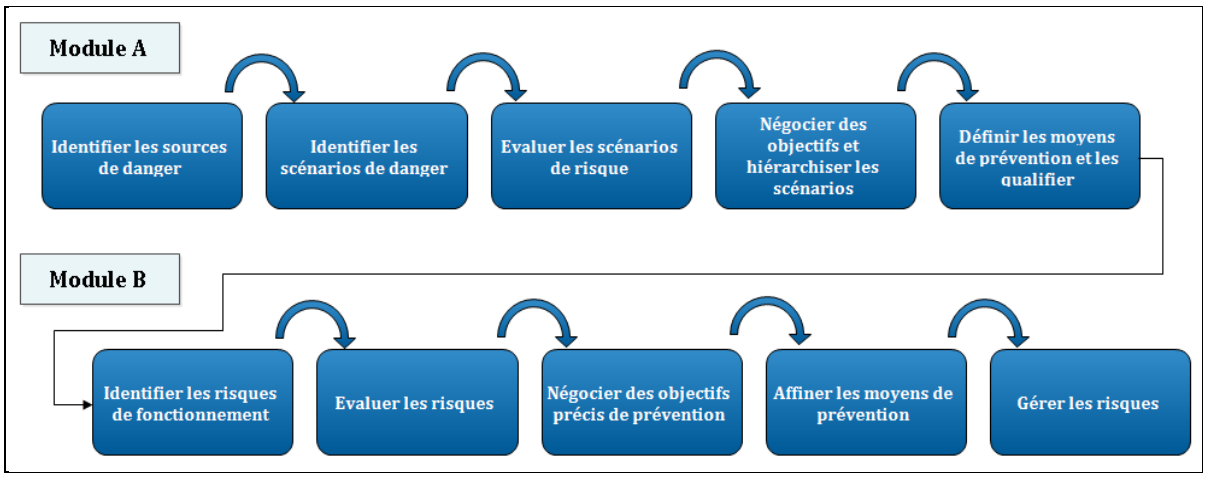


Figure IV. 4. Structure de la méthode MOSAR inspiré de (Perilhon, 2000).

Bien que la méthode MADS-MOSAR permette l'identification des scénarios de risque sur la base des interactions entre les composants du système, elle ne prend pas en compte le comportement dynamique du système en analysant l'évolution de ses composants et son comportement au fil du temps. Cette limite est prise en compte dans le modèle STAMP et FRAM.

Le modèle FRAM (Functional Resonance Accident Model) consiste à décrire le système sociotechnique par ses fonctions et activités plutôt que de sa structure (Hollnagel, 2004). Le but de FRAM est de représenter la dynamique du système, par la modélisation des dépendances non-linéaires, et par une représentation originale de la performance des fonctions et des activités. Ce modèle décompose le système en un ensemble de fonctions non-linéaires liées. Pour chaque fonction, les facteurs qui influencent les performances sont définies (à savoir la disponibilité des ressources, la qualité de la communication, la qualité des interfaces homme-machine ou de la pertinence de la collaboration).

Dans STAMP (Systems Theoretic Accident Model and Processes), un système n'est pas statique. Il est un processus dynamique qui adapte en permanence à réagir aux changements en elle-même et de son environnement (Leveson, 2004). Le système est considéré comme éléments interdépendants qui sont maintenus dans un état d'équilibre dynamique. Le modèle STAMP considère un accident comme résultant d'un contrôle inadéquat des contraintes liées à la sécurité sur la conception, le développement et le fonctionnement du système (Leveson, 2004). A chaque niveau hiérarchique, un contrôle inadéquat peut résulter d'une mauvaise application d'une contrainte de sécurité.

Dans (Bouloiz *et al.*, 2011), un autre modèle d'analyse des risques a été développé qui implique deux outils systémiques : le langage UML et le modèle MADS. Le but de ce modèle est d'intégrer le formalisme UML, en particulier diagramme de collaboration dans le modèle MADS. La source de danger du système du modèle MADS est représentée avec le diagramme de collaboration qui permet d'identifier tous les scénarios possibles à chaque fonction, ou le cas d'utilisation du système. Ce modèle renforce et améliore le modèle MADS classique tel que défini dans (Perilhon, 1999), et garantit la qualité de l'analyse en termes de l'exhaustivité et la cohérence.

2.3. Limites des méthodes d'analyse des risques dans la maintenance

Bien que plusieurs modèles d'analyse des risques soient développés, malheureusement, ils ne sont généralement pas utilisés en raison de limitations spécifiques pour l'activité de maintenance.

Les modèles séquentiels ne prennent pas en compte les interactions entre les composants du système, et ils ne tiennent pas suffisamment en compte les facteurs humains et organisationnels dans la survenue des événements catastrophiques (Jasanoff, 1994, p 361; Paté-Cornell, 1999; Salge and Milling, 2006, Bouloiz *et al.*, 2013). Ces modèles sont basés sur l'approche de l'accident de la chaîne d'événements. Par conséquent, les méthodes traditionnelles d'analyse de risque ne sont pas appropriées pour l'activité de maintenance. Les

faiblesses et les limites des modèles séquentiels sont détaillées davantage dans Leveson (2004).

Les méthodes organisationnelles présentent seulement un modèle statique d'un système. Ils ne permettent pas la formalisation des interactions dynamiques entre les composants du système, et elles ne prennent pas en compte les effets de rétroaction (Garbolino *et al.,* 2009). Par conséquent, elles ne sont pas suffisantes pour comprendre la complexité du système dynamique.

L'approche systémique est une approche efficace pour résoudre l'analyse des risques des problèmes de maintenance. Une rétroaction sur l'analyse des accidents liés à la maintenance montre que ces accidents sont les résultats d'une conception systémique, où les interactions entre les opérateurs et les équipements doivent être considérés à la lumière des interactions complexes entre les opérateurs et l'organisation des activités de maintenance (Monteau and Pham, 1987; Dubois, 2003; Cuny et Gaillard, 2003). Cette complexité affaiblit souvent le message d'un point de vue de l'analyse (Leveson, 2004).

Les modèles systémiques existant FRAM, STAMP et le modèle développé par (Bouloiz *et al.,* 2011) formalisent et mettent en évidence les interactions causales dans les scénarios d'accidents. Ces modèles sont plutôt utilisés pour l'analyse des risques/accident. Ils ne peuvent pas être utilisés comme des modèles d'aide à la décision pour anticiper et éviter les risques pouvant survenir. En plus le manque d'une base de données qui englobe toutes les informations sur un accident (allant de définition du système et les causes jusqu'à les mesures de prévention prises) affaiblit souvent les évaluations d'un accident similaire. Par conséquent, les données mal définies empêchent une meilleure connaissance des faits et ne facilite pas la prise de décision dans un accident similaire.

Le tableau ci-dessous récapitule tous les types de modèles avec leurs avantages et leurs limites :

TABLEAU IV. 2. RECAPITULATIF DES MODÈLES D'ANALYSE DES RISQUES AVEC LEURS AVANTAGES ET LEURS LIMITES.

Type de modèle	Méthodes	Avantages	Limites
Modèles Séquentiels	APR ; AMDE-AMDEC ; HAZOP ; Arbre de défaillance ; Nœud Papillon ; …	- Identification systématique des composantes du risque ; - Communication des risques ; - Complémentarité	- Non prise en compte les interactions qui existent entre les composants du système; - Non traitement suffisant des facteurs humains et organisationnels (Leveson, 2004).
Modèles Organisationnels	SAM ; CREAM ; TRIPOD ; ATHOS ; …	Prise en compte des facteurs humains et organisationnels.	- Présentation seulement un modèle statique d'un système organisationnel ; - Non permission de la formalisation des interactions dynamique entre les

			composantes du système.
Modèles Systémiques	MADS-MOSAR ; STAMP ; FRAM ; MADS-UML.	- Dynamique du système; - Modélisation non-linéaire.	- Non utilisation comme des modèles d'aide à la décision ; - Manque de Base de Données qui englobe toutes les informations sur un accident.

A partir de ces limites et les insuffisances des méthodes existantes décrites, nous allons proposer un modèle conceptuel d'analyse des risquess qui prend en compte le caractère complexe des travaux de maintenance et qui permet d'étudier les différentes interactions entre ses composants. Cette méthode va nous permettre de créer une base de données pour construire les connaissances issues de l'apprentissage des accidents.

3. MODÈLE CONCEPTUEL POUR L'ANALYSE ET L'ÉVALUATION DES RISQUES DES ACTIVITÉS DE MAINTENANCE

Le modèle que nous proposions est basée sur le langage UML (Unified Modelling Language) et la méthode MOSAR (Méthode Organisée et Systémique d'Analyse des Risques) qui consiste à créer une base de données pour l'apprentissage des accidents et permet de prendre en compte le caractère complexe des travaux de maintenance et les interactions entre ses composants.

L'objectif de la méthodologie MOSAR-UML est de présenter les étapes de la méthode MOSAR comme un diagramme de classes pour montrer les interactions entre les différentes entités afin de définir, d'évaluer des scénarios de risque et d'obtenir une base de données qui sera utilisé comme un système d'information pour l'apprentissage des accidents et pour la simulation.

Cette méthodologie appelée MOSAR-UML vise à analyser les risques liés aux activités de maintenance et de maintenir la sécurité du système de maintenance.

MOSAR-UML présente et décrit les étapes de l'analyse des risques dans la méthode MOSAR en utilisant le langage UML (Fig. IV.5). Ces étapes successives sont :

- L'identification et la modélisation des systèmes ;
- L'identification des risques et les principaux scénarios d'accident ;
- La quantification des risques.

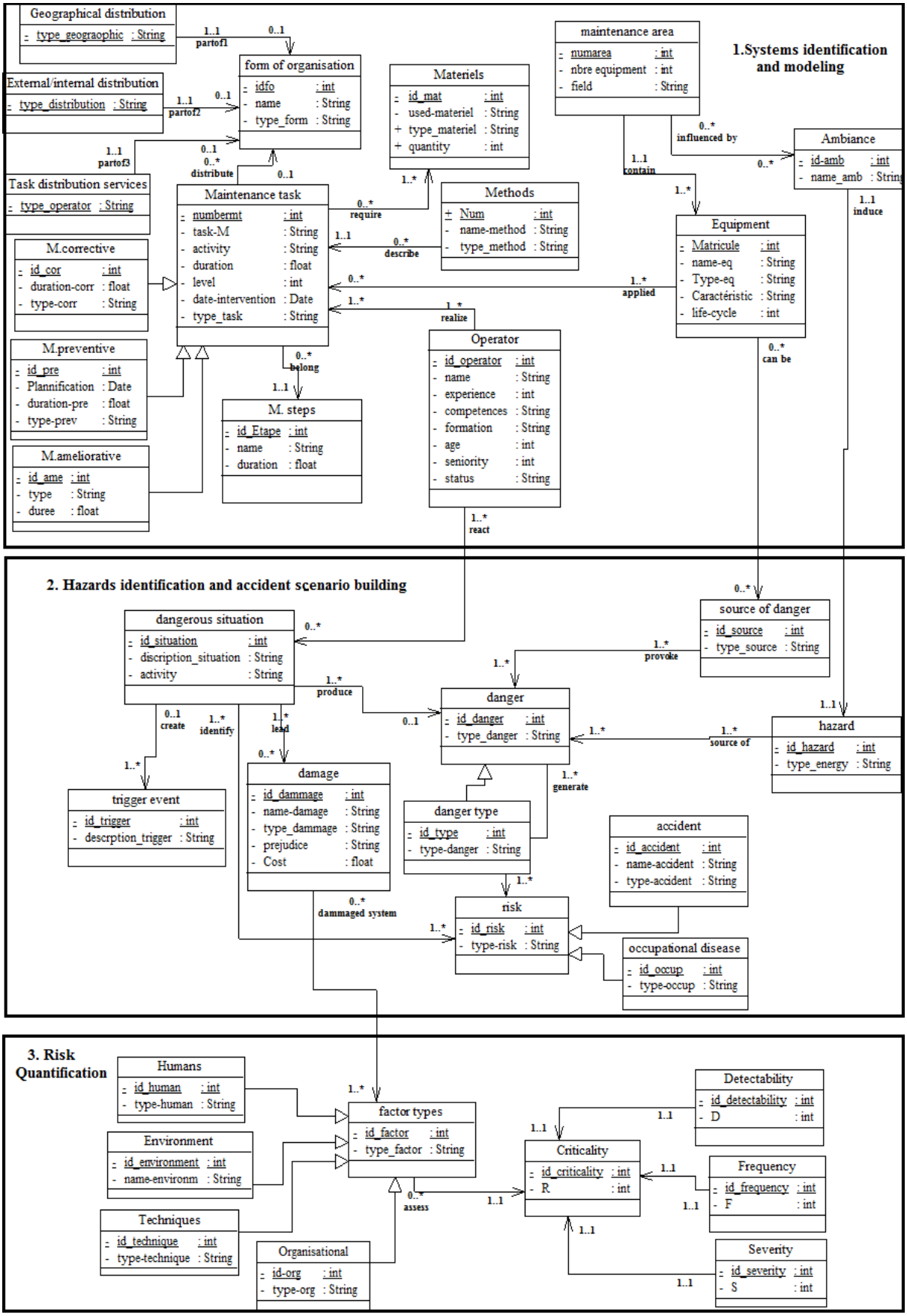


Figure IV. 5. Modèle MOSAR-UML pour l'Analyse des risques des activités de maintenance (Gallab *et al.*, 2017).

La section suivante présente et détaille les étapes de ce modèle d'analyse des risques.

3.1. Identification et modélisation du système

Cette étape est formalisée par un diagramme de classe qui permet de définir et d'identifier le système étudié et de déterminer les éléments de la situation de travail (Fig. IV.6).

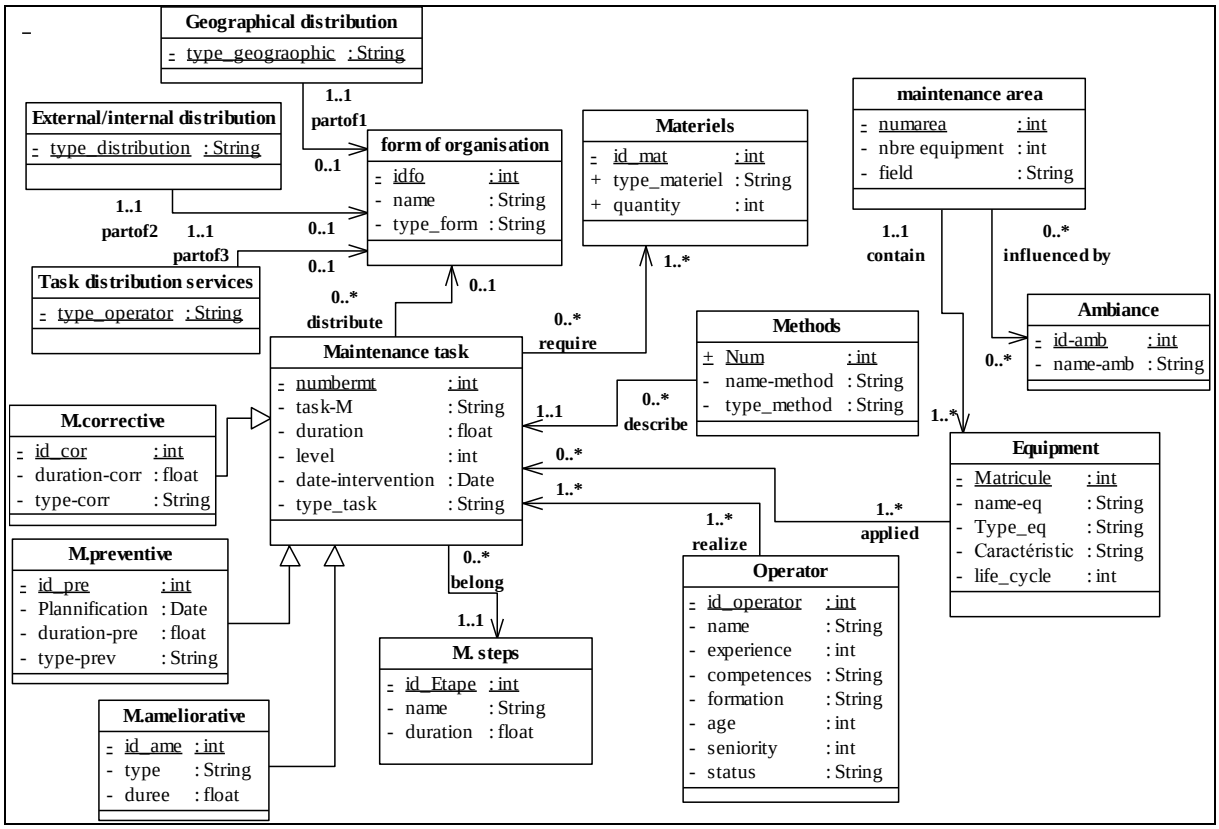


Figure IV.6. Diagramme de classe pour l'identification et la modélisation du système.

Un opérateur effectue une tâche de maintenance qui pourrait être corrective, préventive ou d'amélioration dans une zone d'intervention qui contient un ou un ensemble d'équipements. Chaque tâche appartient à une étape (préparation de l'intervention, la mise en œuvre de l'intervention, de diagnostic, de redémarrage ...) qui nécessite des matériaux (pièces de rechange, des outils, ...) et des méthodes. Cette tâche prend plusieurs formes d'organisation (chapitre 1, section 1.5).

La figure IV.7 modélise l'intervention des opérateurs dans une tâche de maintenance (corrective, préventive ou d'amélioration) et met en évidence les différentes formes d'organisation de la maintenance.

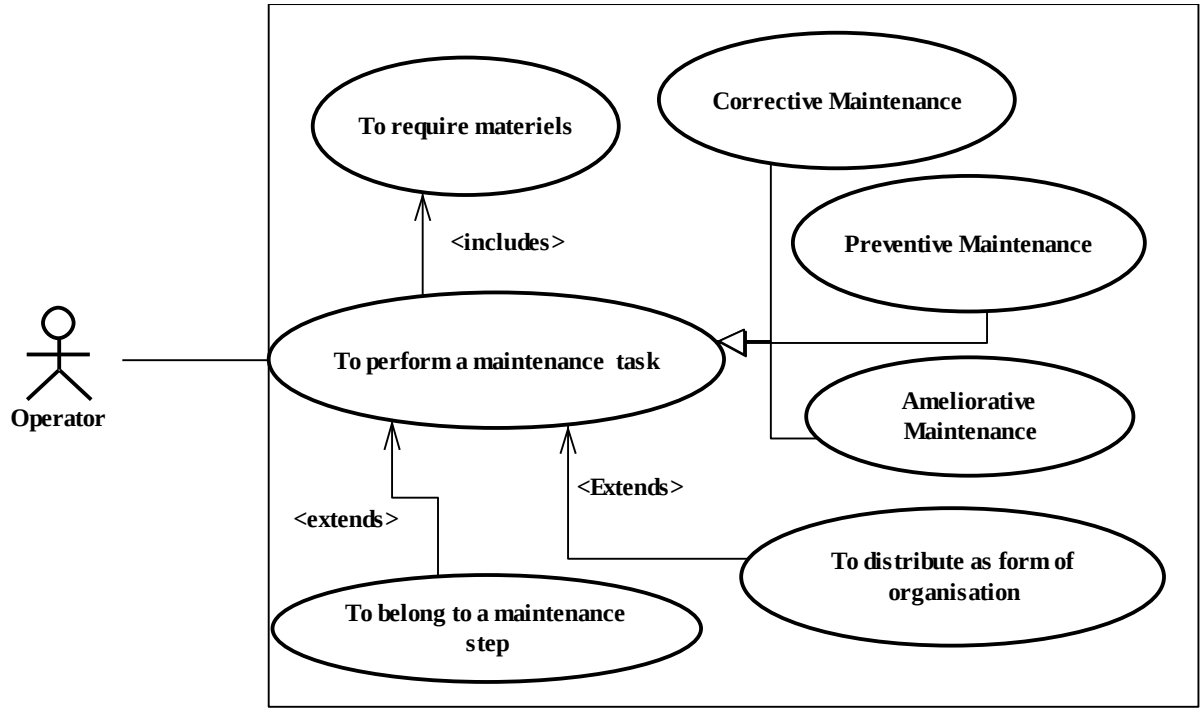


Figure IV. 7. Cas d'utilisation de l'identification du système.

3.2. Identification des dangers et les principaux scénarios d'accidents

Cette étape (fig. IV.8) vise à analyser les risques associés à une activité de maintenance et met en évidence le lien entre la situation de la maintenance et le processus de l'apparition des dommages dont laquelle une situation normale devient dangereuse. La situation de maintenance devient dangereuse quand l'opérateur de maintenance est en contact avec un danger (Fig. IV.9).

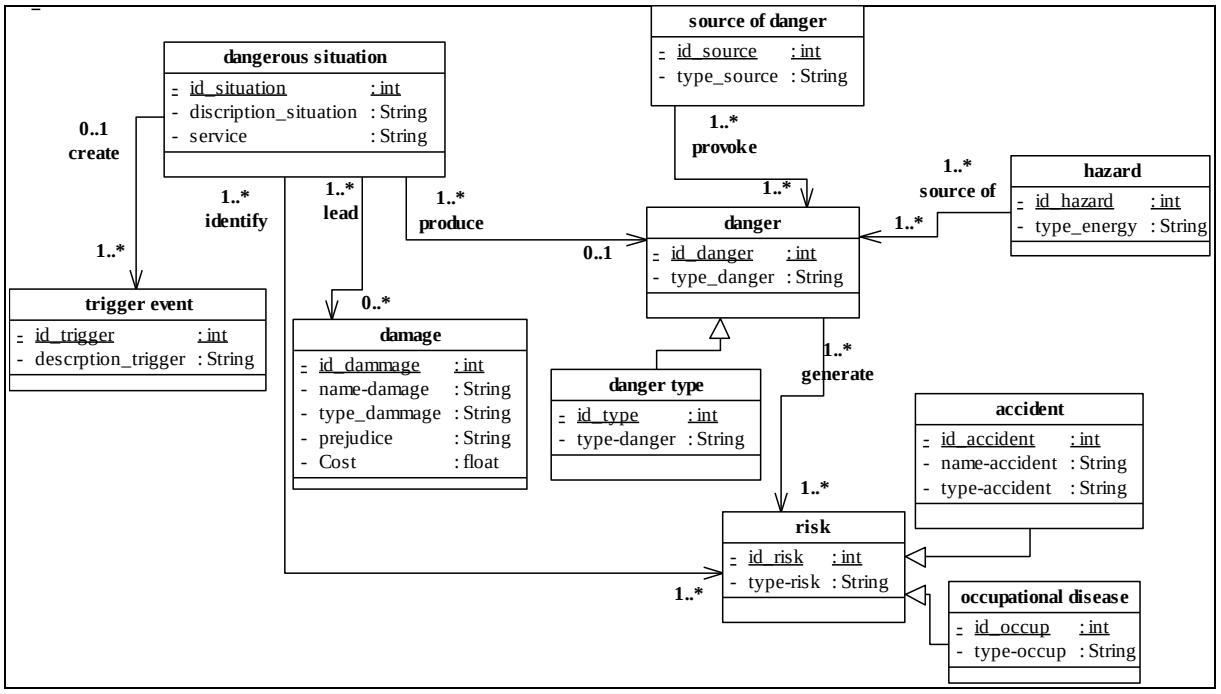


Figure IV. 8. Diagramme de classe pour l'identification des dangers.

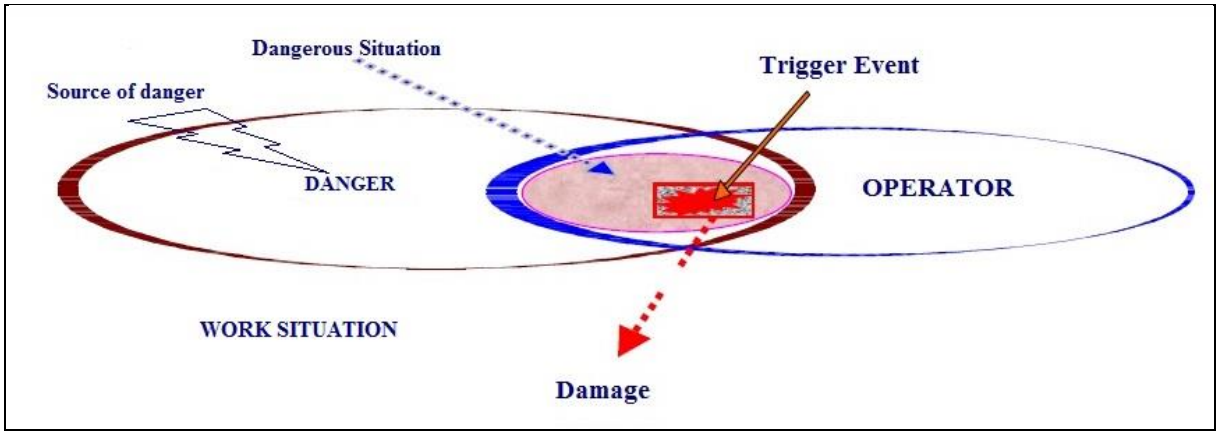


Figure IV. 9. Processus d'apparition d'un dommage.

Ce danger peut être une source d'énergie dans la machine (énergie mécanique, énergie de vibration, énergie électrique, etc.), ou dans l'environnement de travail (par exemple : la température, la lumière, le bruit, etc.). L'exposition au danger produit un risque qui conduit à des dommages avec la présence d'un événement déclencheur. Par exemple, dans le cas de maintenance d'une pièce nue sous tension (danger), l'électricien se trouve dans une situation dangereuse quand ses mains sont à quelques millimètres de la pièce électrique. Cette situation peut conduire à un choc électrique (dommages) lorsque la personne entre en contact avec cette pièce (événement déclencheur).

3.3. Quantification des risques

Les risques qui ont été identifiés à l'étape précédente seront classés en fonction de quatre facteurs : humains, environnementaux, techniques et organisationnelles (Fig. IV.10).

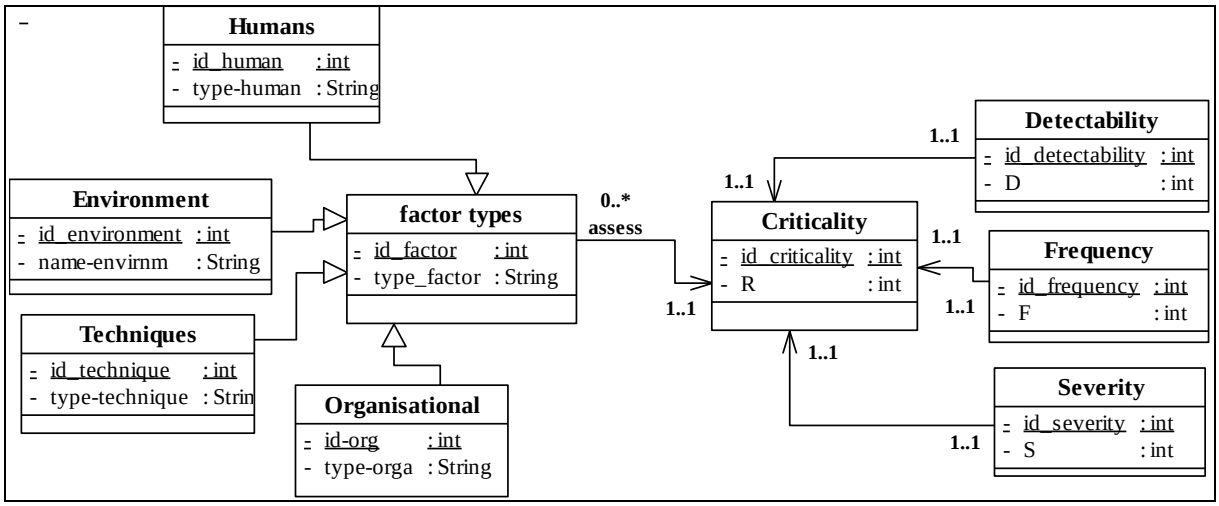


Figure IV. 10. Diagramme de classe pour la quantification des risques.

Ces facteurs seront évalués afin de hiérarchiser les risques. Pour chaque élément, la criticité est automatiquement calculée à partir de trois paramètres : la fréquence, la gravité et la détection en utilisant le langage SQL. Ce programme SQL permet de calculer la valeur de R (criticité) et met à jour la table une fois la valeur de l'un des trois paramètres est changée.

TABLEAU IV. 3. PROGRAMME SQL POUR LE CALCUL DE LA CRITICITÉ.

```
CREATE OR REPLACE FUNCTION inserToRfunc() RETURNS TRIGGER AS
$example_table$
DECLARE
    fVar INTEGER;
    dVar INTEGER;
    BEGIN
     select f into fVar from Frequency where
idcriticality=NEW.idcriticality;
     select d into dVar from Detectability where
idcriticality=NEW.idcriticality;
     if fvar IS NOT NULL and dVar IS NOT NULL then
     update  Criticality  set r=fVar*dVar*New.s where
idcriticality=NEW.idcriticality;
     end if;
        RETURN NEW;
    END;
$example_table$ LANGUAGE plpgsql;
CREATE OR REPLACE FUNCTION inserToRForFfunc() RETURNS TRIGGER
AS $example_table$
DECLARE
    sVar INTEGER;
    dVar INTEGER;
    BEGIN
     select s into sVar from Severity where
idcriticality=NEW.idcriticality;
     select d into dVar from Detectability where
idcriticality=NEW.idcriticality;
     if svar IS NOT NULL and dVar IS NOT NULL then
     update  Criticality  set r=sVar*dVar*New.f where
idcriticality=NEW.idcriticality;
     end if;
        RETURN NEW;
    END;
$example_table$ LANGUAGE plpgsql;
CREATE OR REPLACE FUNCTION inserToRForDfunc() RETURNS TRIGGER
AS $example_table$
DECLARE
    sVar INTEGER;
    fVar INTEGER;
    BEGIN
     select s into sVar from Severity where
idcriticality=NEW.idcriticality;
     select f into fVar from Frequency where
idcriticality=NEW.idcriticality;
     if svar IS NOT NULL and fVar IS NOT NULL then
     update  Criticality  set r=sVar*fVar*New.d where
idcriticality=NEW.idcriticality;
     end if;
        RETURN NEW;
```

```
    END;
$example_table$ LANGUAGE plpgsql;
CREATE TRIGGER addR  After  INSERT or UPDATE     ON Severity
 FOR EACH ROW EXECUTE PROCEDURE inserToRfunc();
      ;
      CREATE TRIGGER addRForF  After  INSERT or UPDATE   ON
Frequency
 FOR EACH ROW EXECUTE PROCEDURE inserToRForFfunc();
      ;
      CREATE TRIGGER addRForD  After  INSERT or UPDATE     ON
Detectability
 FOR EACH ROW EXECUTE PROCEDURE inserToRForDfunc();
      ;
```

La méthode MOSAR-UML présentée dans la figure IV.11 va nous permettre de développer une base de données nommée **data** contenant 46 tables (Fig. IV.11). Cette base de données est construite à l'aide de PostgreSQL. Chaque table de la base de données est une entité du diagramme de classes qui va stocker les informations.

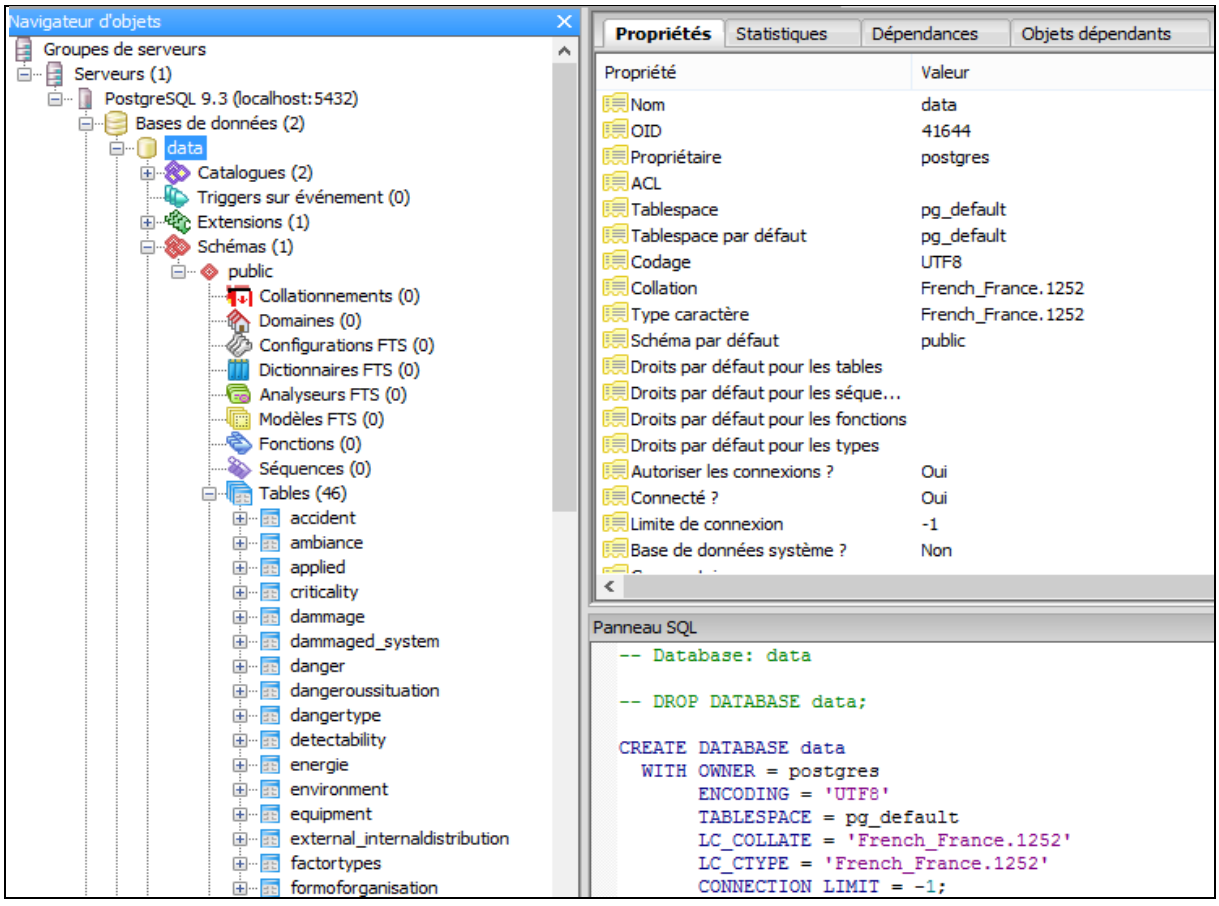


Figure IV. 11. Extrait de la Base de données.

Les données de ces tables seront regroupées dans trois tableaux (Tableau VI.1, VI.3 et VI.7, comme indiqué dans le chapitre VI) qui représenteront les informations essentielles des étapes du modèle MOSAR-UML. Ces tableaux peuvent être modifiés et adaptés selon les nécessités de chaque cas. Ces tableaux sont construits à l'aide du langage SQL.

Le code SQL pour l'obtention des tableaux de chaque étape est comme suit :

- **Identification et modélisation du système :**

TABLEAU IV. 4. PROGRAMME SQL POUR PRÉSENTER LE TABLEAU DE L'IDENTIFICATION DU SYSTÈME.

```
CREATE OR REPLACE VIEW view1 AS
select mt."task-
M",mt.activity,mt.typetask,fo.name,m.used_materiel,me.name_met
hod,ma.nbreequipment,e.typeeq,a.name_amb

from maintenancetask mt,maintenancearea ma,methods
me,materiels m,ambiance a,equipment e,formoforganisation
fo,requires rq,weight we, applied ap

where  mt.numbermt=rq.numbermt and m.idmat=rq.idmat and
mt.numbermt=me.numbermt  and e.matricule= ap.matricule and
ap.numbermt=  mt.numbermt and

 mt.id=fo.id and ma.numarea=we.numarea and
a.typeamb=we.typeamb and e. numarea =ma. numarea
```

- **Identification des dangers et les principaux scénarios d'accidents:**

TABLEAU IV. 5. PROGRAMME SQL PRÉSENTANT LA 2ème ÉTAPE DU MODÈLE MOSAR-UML.

```
CREATE OR REPLACE VIEW view2 AS
select
mt.activity,d.discriptionsituation,t.descrptiontrigger,h.nameh
azard,dg.typedanger,s.typesource,dm.typedammage,rk.type_risk

from maintenancetask mt,dangeroussituation d,triggerevent
t,hazard h,danger dg,sourceofdanger s,dangertype dt,dammage
dm,risk rk,realize re,operator o,react rt,sourceof sf,provoke
pr,lead l ,identify i

where mt.number=re.number and re.idoperator=o.idoperator and
o.idoperator=rt.idoperator and d.idsituation=rt.idsituation
and t.idsituation=d.idsituation and h.idhazard=sf.idhazard and
sf.iddanger=dg.iddanger and d.iddanger=dg.iddanger and
pr.iddanger=dg.iddanger and pr.idsource=s.idsource and
dg.iddanger=dt.iddanger and l.idsituation=d.idsituation and
l.iddammage=dm.iddammage

and  i.idsituation=d.idsituation and i.idrisk=rk.idrisk
```

- **Quantification des risques:**

TABLEAU IV. 6. PROGRAMME SQL POUR LA QUANTIFICATION DES RISQUES.

```
CREATE OR REPLACE VIEW view3 AS
select
dm.name_damage,rk.type_risk,ft.typefactor,s.s,f.f,d.d,c.r
from dammage dm,risk rk,factortypes ft,severity s,frequency
f,detectability d,criticality c,dangeroussituation ds,identify
i,lead l,dammaged_system dms
where  l.idsituation=ds.idsituation and
l.iddammage=dm.iddammage and i.idsituation=ds.idsituation and
i.idrisk=rk.idrisk and dms.iddammage=dm.iddammage and
dms.idfactor=ft.idfactor

and ft.idcriticality=c.idcriticality and
c.idcriticality=s.idcriticality and
c.idcriticality=d.idcriticality and
c.idcriticality=f.idcriticality
```

4. CONCLUSION

Dans le cadre du présent chapitre, nous avons commencé par clarifier les différents concepts liés à l'analyse des risques, et distinguer entre le management des risques, l'analyse des risques et l'évaluation du risque. Après, nous avons présenté un panorama des méthodes d'analyse des risques, leurs évolutions et leurs limites relatives aux activités de maintenance. À partir de ces limites, nous avons proposé une nouvelle méthode nommée « MOSAR-UML » pour l'analyse des risques des tâches de maintenance. L'utilisation d'UML et de la méthode MOSAR semble être des outils utiles pour définir les scénarios de risques, quantifier leur criticité et pour les traiter sur une base hiérarchique en fonction de plusieurs facteurs de risque (humaines, techniques, organisationnelles et environnementales). Cette méthode nous a permis d'obtenir une base de données qui sera utilisée comme un système d'information pour l'apprentissage des accidents et exploitée pour la simulation à l'aide d'un Système Multi-Agents.

Le chapitre suivant présente la simulation par les Systèmes Multi-Agents en présentant ses méthodes de conception et ses plateformes. Il présente aussi l'architecture de notre SMA.

BIBLIOGRAPHIE

Bertalanffy, V. L., 1968. General systems theory, foundation, development, applications. New York, USA.

Bouloiz, H., Garbolino, E., Tkiouat, M., 2011. Risk Analysis Model Using UML and MADS model', Journal of Safety Science and Technology, 1, pp. 108-114.

Bouloiz, H., Garbolino, E., Tkiouat, M., Guarnieri, F., 2013. A system dynamics model for behavioral analysis of safety conditions in a chemical storage unit. Safety Science, 58, pp. 32-40.

Bouloiz, H., Garbolino, E., Tkiouat, M., Bendaha, T., 2014. A conceptual and cognitive model for occupational hazards analysis in maintenance tasks', International Journal of Computer Aided Engineering. ISSN: 1071-2317, Vol.24, Issue.1, January, pp.1113-1119.

BSI OHSAS 18001. 2005. Occupational Health and Safety Management Systems- Specification. England: BSI.

Ccps, C., 1992. Guidelines for Hazard Evaluation Procedure with Worked Examples, 2nd Edition, CCPS AIChE, New York.

CEI 50 (191). 1990. International Electro-technical Vocabulary, Chapter 191: Dependability and Quality of Service. CEI.

CE (European Commission), 1999. The concerted Action on Formal Safety and Environmental Assessment of Ship operations. Report y Germanischer Lloyd and Det Norske Veritas, project funded by the European Commission under the Transport RTD, Program of the 4th Framework Programme, 1999.

Cherkaoui, A., Lopez, P., 2009. 'CO2 Storage Risk Assessment: Feasibility Study of the Systemic Method MOSAR'.

Craweley, F. Preston, M., Tyler, B., 1999. HAZOP: Guide to Best Practice. Institution of Chemical Engineers and European Process Safety Centre, Rugby.

Cuny, X., Gaillard, I., 2003. Occupational risks today: current problems, methodological perspectives and directions. In D.R. Kouabenan, M. Dubois (eds.), Occupational hazards, changing Approaches, new perspectives. Toulouse, Octers Editions, 25-36.

Desroches, A., Leroy, A., Quaranta, J.F., Vallée, F., 2006. Dictionary of analysis and risk management. Lavoisier, p.232.

Desroches, A., Leroy, A., Vallée, F., 2007. Risk Management. Lavoisier, p. 101.

DNV (Det Norske Veritas). 1995. Feasibility Study for Safety Assessment of RoRo Passenger Vessels. Report prepared by the Det Norske Veritas Limited, Technical Consultancy, London, UK.

Dubois, M., 2003. Introduction. In D.R. Kouabenan, M. Dubois (eds.), Occupational Hazards, changing approaches new perspectives. Toulouse, Octars Editions, 13-19.

Flanagan, R., Norman, G., 1993. Risk Management and Construction Blackwell Science Ltd.

Gallab, M., Bouloiz, H., Tkiouat, M., 2017. Towards a model for developing an information system as a decision support to risk assessment. International Journal of Industrial and Systems Engineering, Vol. 25, N°1, pp. 110-129.

Garbolino, E., Chery, J.P., Guanieri, F., 2009. Dynamic Systems Modelling to improve risk analysis in the context of seveso industries. Chemicals Engineering Transactions, vol. 17, pp. 373-378.

Garlick, A., 2007. Estimating Risk, a management approach. Gower Publishing Limited, England, pp 9-31.

Groeneweg, J., Lancioni, G. E., Metal, N., 2002. In Bedford., and van Gelder. (Eds.), Tripod: 'Managing organisational components of business upsets' (pp. 707e712). Safety and Reliability, ISBN 90 5809 551 7.

Heurtel, A., 2003. La gestion des risques techniques et des risques de management. CNRS- IN2P3/LAL.

Hollnagel, E., 1998. Cognitive Reliability and Error Analysis Method: CREAM. Elsevier Science, Amsterdam.

Hollnagel, E., 2004. Barrier Analysis and accident prevention. Published by Ashgate publishing company, England, ISBN 0754643018.

IEC (International Electro-technical Commission). 1995. Dependability Management- Risk Analysis of Technological Systems (International Standard IEC 300-3-9), IEC, Geneva.

ISO 14971. 2000. Application de la gestion des risques aux dispositifs médicaux ISO.

ISO/ CEI Guide 51. 1999. Aspects liés à la sécurité- principe directeur pour les inclure dans les normes ISO/CEI.

Jasanoff, S., 1994. Learning from Disaster: Risk Management after Bhopal. University of Pennsylvania Press, Philadelphia, 361.

Khan, F. I., Abbasi, S. A., 1998. Techniques and Methodologies for Risk Analysis in Chemical Process Industries. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Vol. 11, No. 4, pp. 261-277.

Khan, K., Sadiq, R., Haddara, M., 2004. Risk-based inspection and maintenance (RBIM): multi-attribute decision making with aggregative risk analysis. Process Safety and Environmental Protection, 82, pp. 398–411.

Koivisto R., Wessberg N., Eerola A., Ahlqvist T., Kivisaari S., Myllyoja J., Halonen M., 2009. Integrating future-oriented technology analysis and risk assessment methodologies. Technological Forcasting and Social Change (76) 1163-1176.

Le Coze, J.C., Vince A.S., Salvi O., Prats F., Plot E., 2002. Development of the ATOS concept, analysis of technical and organisational safety. Proceeding of ESRET 2002 conference. 19-21 mars 2002. Lyon.

Le Moigne, J. L., 1977. The theory of General System', Edition PUF.

Leveson, N., Daouk, M., Dulac, N., and Marais, K.., 2004. Applying STAMP in accident analysis, submitted for publication, (http://sunnyday.mit.edu/accidents/walkerton.pdf).

Magne, L., Vasseur, D., 2006. Industrial risks, complexity, uncertainty and decision: an interdisciplinary approach. Lavoisier, Collection EDF RandD, p. 181.

Mazouni, M.H., 2008. For a Better Approach to Risk Management: From the Ontological Modelling of Accidental Process in Interactive System Decision Support, Thesis PhD from the Institute National Polytechnic de Lorraine Specialty: Automatic, Signal Processing and Computer Engineering, November 2008, pp. 39-42.

Monteau, M., Pham, D., 1987. Occupational accident: Evolution of conceptions. In C. Lévy.

Nicolet-Monnier, M., 1996. Integrated Regional Risk Assessment: The Situation in Switzerland. International Journal of Environment and Pollution, Vol. 6, No. 4-5, pp. 441-461.

Paté-Cornell, E., Murphy, D.M., 1996. Human and management factors in probabilistic risk analysis: the SAM approach and observations from recent applications. Reliability Engineering and System Safety. Elsevier Science Ltd.p. 115-126.

Paté-Cornell, M.E., 1999. A post mortem analysis of the piper alpha accident: technical and organizational factors. Risk Analysis 13 (2), pp. 215–232.

Périlhon, P., 1999. Risk to Risk Analysis: Development of a MOSAR method, method organized and systemic risk analysis, the working document.

Perilhon, P., 2000. Methodical elements, Phoebus n°12, January, February, March p.31 à 49.

Perrow, C., 1994. The limits of safety: the enhancement of a theory of accidents. Journal of Contingencies and Crisis Management, 2, (4).

Pintelon, L., N. Muchiri, P., 2009. Safety and Maintenance. Handbook of Maintenance Management and Engineering. Springer Dordrecht Heidelberg London New York.

Rasmussen, J., 1997. Risk management in a dynamic society: a modelling problem. Safety Science, Volume 27, No. 2/3 (1997): 183-213, doi: 10.1016/S0925-7535(97)00052-0.

Reason, J., 1990. Human Error. New York, NY: Cambridge University Press.

Reason, J., 1997. Managing the Risks of Organizational Accidents, Ashgate.

Roberts, K. H., 1990. Some characteristics of one type of high reliability organization. Organization Science, 1(no 2), pp. 160-176.

Rogers, R.I., 2000. The RASE project risk assessment of unit operations and equipment, http://www.safetynet.de/.

RSSG (Royal Society Study Group, UK). 1992. Risk Analysis: Perception and Management. Report of the Royal Society Study Group, UK, London 1992, Based on British Standards 4778, 1991.

Sadgrove, K., 2005. The complete guide to business risk management, 2nd edition, Gower Publishing Limited, England, pp 277-284.

Salge, M., Milling, M. P., 2006. Who is to blame, the operator or the designer? Two stages of human failure in the Chernobyl accident. System Dynamics Review, 22(no 2), 89e112.

Tixier, J., Dusserre, G., Salvi, O., Gaston, D., 2002. Review of 62 risk analysis methodologies of industrial plants. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 15, pp. 291-303.

Veyret, Y., Beucher, S., Reghezza, M., 2004. Les risques. Bréal. ed, Amphi Géographie- Capes/Agrégation. Paris.205p.

CHAPITRE V

SIMULATION PAR LES SYSTÈMES MULTI-AGENTS

INTRODUCTION **107**
1. LA SIMULATION : CONCEPTS ET GÉNÉRALITÉS 107
2. L'APPROCHE MULTI-AGENTS 109
2.1. Agents 110
2.1.1. Définitions et caractéristiques 110
2.1.2. Types d'agents 112
2.1.3. Quelques architectures Agents 113
2.2. Système Multi-Agents 113
2.2.1. Définition et caractéristique 113
2.2.2. Environnement des SMA 116
2.2.3. Applications des SMA dans le domaine industriel 117
2.2.4. Intérêts et choix des SMA 117
3. LES MÉTHODES DE CONCEPTION DES SYSTÈMES MULTI-AGENTS 118
4. LES PLATEFORMES DES SYSTÈMES MULTI-AGENTS 119
5. LA PLATEFORME ANYLOGIC® 123
5.1. Définition 123
5.2. Avantages de la plateforme AnyLogic 123
5.3. Applications de la plateforme AnyLogic 124
5.4. Intérêts et choix de la plateforme AnyLogic 124
6. L'ARCHITECTURE DU MODÈLE PROPOSÉ 124
6.1. Objectif du modèle proposé 125
6.2. Architecture technique pour la conception d'un SMA 125
6.3. Méthode de conception d'un SMA 126
6.3.1. Les Agents 126
6.3.2. Les interactions 132
6.3.3. L'organisation 134
6.3.4. L'environnement 136
7. CONCLUSION 136
BIBLIOGRAPHIE 136

INTRODUCTION

Le domaine des Systèmes Multi-Agents (SMA) est relativement jeune. Il est apparu dans les années 1980, suite à l'évolution considérable des applications informatiques qui sont devenus de plus en plus distribués et diffusés dans de multiples objets. La nécessité de la modélisation technique et de la simulation de la performance dans le domaine des sciences de vie où l'utilisation des équations différentielles pour décrire l'évolution d'un écosystème est difficile, voire impossible, d'où une autre raison de l'émergence de l'approche multi-agent (Drogoul, 1993; Ferber, 1995; Bakhta, 2013; Naciri and Tkiouat, 2015a).

L'approche multi-agent est le résultat de la recherche en Intelligence Artificielle "IA". En effet, le paradigme de "IA" est insuffisant pour résoudre certains types de problèmes complexes et hétérogènes. Plusieurs études ont conduit à la naissance de la deuxième génération de ce domaine; appelé l'Intelligence Artificielle Distribuée "IAD". L'objectif de "IAD" est de remédier aux faiblesses de "IA" classique en introduisant l'idée de distribuer une expertise sur un ensemble d'entités autonomes en interactions qui fonctionnent et agissent dans un environnement. Ces entités ou agents interagissent pour atteindre un certain objectif commun. L'apparition de nouveaux concepts tels que la coopération, la coordination, la négociation et l'émergence a montré l'importance et la pertinence des SMA comme un outil de résolution de problèmes (Erceau and Ferber, 1991; Drogoul, 1993; Ferber, 1995; Bakhta, 2013; Naciri and Tkiouat, 2015a).

Ce chapitre expose un état de l'art du paradigme multi-agent et présente l'histoire de l'évolution de l'agent, ses différentes définitions, ses caractéristiques et ses classifications. Mais tout d'abord, nous présentons des généralités sur la simulation avec ses avantages et les différentes méthodes de conception des SMA avec les plateformes de développement permettant la réalisation de la simulation dynamique. Enfin, nous proposons une architecture conceptuelle du modèle multi-agent qui sera par la suite simuler dans la plateforme AnyLogic.

1. LA SIMULATION : CONCEPTS ET GÉNÉRALITÉS

La simulation est une démarche scientifique qui consiste à réaliser une reproduction artificielle, nommée modèle, d'un phénomène réel que l'on désire étudier, à observer le comportement de cette reproduction lorsqu'on en fait varier certains paramètres, et à en introduire ce qui se passerait dans la réalité sous l'influence de variations analogues (Drogoul, 1993). C'est une technique qui permet de mener les expériences de prise de décision en observant les caractéristiques d'un système donné sous différentes configurations.

Le modèle de simulation est un ensemble d'instructions, des règles, des équations ou des contraintes permettant de générer l'entrée pour avoir le comportement de sortie (Zeigler *et al.*, 2000).

La démarche de simulation passe par trois étapes distinctes : l'étape de modélisation, qui repose sur la construction du modèle de phénomène à étudier, l'étape d'expérimentation, qui réside en la soumission de ce modèle à un certain type de variations, et l'étape de validation, qui consiste à confronter les données expérimentales obtenues avec le modèle à la réalité (Drogoul, 1993).

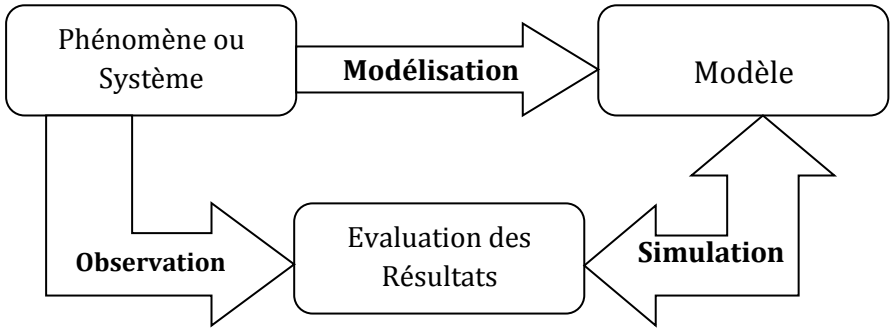


Figure V. 1. Principe de la simulation (d'après Drogoul (1993)).

Généralement, la simulation a pour objectif de minimiser les charges, de redimensionner le système à l'aide des indicateurs, de voir un comportement du système, de présenter des situations anormales, et de montrer les interactions et la dynamique. En effet, la simulation permet de réaliser des expériences virtuelles, ce qui présente de nombreux avantages car parfois il serait impossible, ou peu pratique, de réaliser des expériences réelles.

Le recours aux méthodes de simulation présente plusieurs avantages qui résident (Drogoul, 1993; Law and Kelton, 2000; Banks *et al.*, 2005; Grigoryev, 2015) dans:

- **La valeur:** Lorsqu'un système est redéfini (réduction de personnel, donc diminution des ventes, du service client, du temps de réponse, etc.), une simulation peut permettre d'équilibrer les paramètres clés (remises, changements de processus, publicité, etc.). Un modèle de simulation peut ainsi offrir un excellent retour sur investissement.
- **Le temps:** Un modèle de simulation peut faire apparaître des effets à long terme (sur des mois ou des années) en quelques minutes.
- **La répétabilité:** Les paramètres d'un modèle peuvent être variables, un nombre illimité d'expériences différentes peuvent être réalisées. Cela permet des prévisions rapides lorsque les conditions du système changent.
- **La précision:** Les détails importants sont pris en compte. La structure du système et ses processus sont décrits naturellement. Les formules mathématiques et les méthodes d'abstraction ne sont pas nécessaires.
- **La visibilité:** La visualisation de la simulation au fil du temps et les animations illustrent le fonctionnement du système, tandis que des graphiques quantifient les résultats. Présenter ses idées est nettement plus simple et agréable.

- **La versatilité :** Des problèmes dans tous les domaines peuvent être résolus (industrie, logistique, finance, santé, etc.). A chaque fois, la vie réelle est simulée par de nombreuses expériences, sans jamais influencer directement le système réel.

La simulation par les systèmes multi-agents sert à analyser et simuler les différentes interactions existant entre agents autonomes d'un système global. La simulation à base d'agents est utilisée pour modéliser certains domaines du monde réel et des systèmes complexes.

2. L'APPROCHE MULTI-AGENTS

L'utilisation des SMA a été déclenché par le désir d'obtenir un aperçu plus profond dans les systèmes qui ne sont pas bien capturés par les autres approches de modélisation (allant des modélisations de sociétés, jusqu'aux sciences humaines).

L'approche Multi-Agent se trouve à l'intersection de plusieurs disciplines. Les deux plus importants sont l'intelligence artificielle distribués (IAD) et l'intelligence artificielle (IA). Le but de l'intelligence artificielle distribuée est de réaliser des systèmes d'organisation qui permettent de résoudre les problèmes par le raisonnement basé sur la manipulation des symboles (mathématiques discrètes, la logique du premier ordre, etc.). Alors que l'intelligence artificielle cherche à comprendre et à modéliser les systèmes capables de survivre, de penser, etc.

Les systèmes multi-agents offrent des solutions aux limites de l'approche mathématique (Drogoul, 1993). Ces SMA s'intéressent à étudier les comportements collectifs résultants de l'organisation et des interactions entre agents pour résoudre un problème ; ils permettent « ... *de modéliser le comportement d'un ensemble d'entités expertes, plus ou moins organisées selon des lois de type social. Ces entités ou agents, disposent d'une certaine autonomie et sont immergées dans un environnement dans lequel et avec lequel elles interagissent* » (Erceau and Ferber, 1991). Ils permettent de:

- Représenter les phénomènes inter-temporelles en économie, en finance, en industrie, …;
- Représenter le comportement hétérogène;
- Représenter, par exemple, des changements sans demande de contrainte ou de budget;
- Représenter un système en constante évolution et éviter par conséquent le compte d'équilibre;

De plus, certaines propriétés sont difficiles, voire impossibles à prendre en compte dans les modèles mathématiques. Parmi ces propriétés (Helbing and Balietti, 2012): la naissance, la mort et la reproduction, les besoins individuels des ressources (manger et boire), la perception, la curiosité, le comportement d'exploration, la capacité à innover, les émotions, la mémoire et les futures attentes, la capacité de mobilité et de transport, la communication, la capacité d'apprentissage et de l'enseignement, la possibilité de négociation et l'échange, et la tendance à avoir des relations avec d'autres agents (à savoir la famille ou des liens d'amitié etc.).

L'évolution des SMA au travers de la littérature selon les travaux reconnus dans le domaine de recherche des agents est comme suit (Labarthe, 2006) :

- Le modèle d'Acteur pour la résolution des problèmes par l'envoi des messages asynchrones (Hewitt, 1977) ;
- L'architecture « blackboard » pour le partage d'informations entre agents (Erman *et al.,* 1980) ;
- Le protocole de réseau contractuel pour l'allocation des tâches « Contract Net Protocol » (Smith, 1980) ;
- Le système Distributed Vehicule Monitoring Task (Lesser and Corkill, 1983) ;
- Le travail qui synthétise un ensemble de publications dans « IAD » publié par Gasser et Alan Bond (Gasser *et al.,* 1989).

Ces travaux présentant l'origine des SMA ont abordé de nombreux concepts et définitions qui caractérisent le paradigme « Agent » ainsi que d'autres références telles que (Bratman, 1987; Wooldridge and Jennings, 1995 ; Ferber, 1995 ; Weiss, 1999).

2.1. Agents

2.1.1. Définitions et caractéristiques

Le concept d'agent a été utilisé par divers domaines et disciplines au cours de plusieurs décennies. Ce terme ne se contentait pas sur les domaines de robotiques ou de l'intelligence artificielle, mais aussi dans d'autres disciplines telles que la philosophie et la psychologie. Aujourd'hui, ce concept est utilisé presque dans tous les domaines et dans plusieurs nouvelles applications.

Dans la littérature, il existe une multitude de définitions sur la notion d'agent. En effet, Drogoul (1993) a défini un agent comme une entité qui est en mesure d'exercer un contrôle sur les processus locaux de la perception, la communication, l'apprentissage, le raisonnement, la prise de décision ou d'exécution. Selon (Wooldridge and Jennings, 1995), un agent est un système informatique, situé dans un environnement, et qui agit d'une façon autonome et flexible afin d'atteindre les objectifs pour lesquels il a été conçu. Quant à Ferber (Ferber, 1995) a présenté un agent comme une entité autonome physique ou abstraite qui est capable d'agir sur lui-même et sur son environnement, qui peut communiquer avec d'autres agents dans un environnement commun et dont son comportement est le résultat de ses observations, ses connaissances et ses interactions avec d'autres agents qui tend à satisfaire ses objectifs. Weiss (Weiss, 1999) explique qu'un agent est une entité de calcul tel qu'un logiciel ou un robot qui peut être considéré comme percevant et agissant sur son environnement et qui autonome lié à son comportement qui dépend de sa propre expérience.

Une définition plus récente a été présentée par Russel and Norving (2003), un agent est tout ce qui peut être considéré comme une perception de son environnement grâce à des capteurs et agissant sur l'environnement par les effecteurs.

Chaque agent possède des :

- Compétences : il a, pour atteindre ses objectifs, une panoplie d'actions possible ;
- Croyances : il a une vue de son environnement et des autres agents ;
- Accointances : il a des agents avec qui communiquer ;
- Aptitudes : il a les capacités de percevoir et d'accomplir ses actions.

Wooldridge et Jennings (1995) définissent un agent intelligent en se référant à quatre caractéristiques :

- **Réactivité:** l'agent maintient une interaction continue avec son environnement et répond aux changements qui s'y produisent ;

- **Autonomie:** un agent opère seul sans l'intervention directe d'un tiers (humain ou autre), et ne subit aucun contrôle sur les actions qu'il réalise, ni sur son état interne ;

- **Pro-activité:** l'agent doit avoir des comportements « orientés-buts » en prenant les initiatives nécessaires à l'atteinte de ses objectifs ;

- **Capacité sociale:** l'agent est capable d'interagir avec d'autres agents, via des langages de communication, dans le but d'atteindre ses objectifs.

Divers caractéristiques de l'entité Agent sont présentées par (Ferber, 1995), définissant un agent comme étant :

- Une entité physique ou virtuelle ;
- Capable d'agir dans un environnement ;
- Peut communiquer directement avec d'autres agents ;
- Qui est gouverné par un ensemble de tendances (sous la forme d'objectifs individuels ou d'une fonction de satisfaction, voire de survie, qu'elle cherche à optimiser) ;
- Qui possède des ressources propres ;
- Qui est capable de percevoir (de manière limitée) son environnement ;
- Qui ne dispose que d'une représentation partielle de cet environnement (et éventuellement aucune) ;
- Qui ne dispose que d'une représentation partielle de cet environnement ;
- Qui possède des compétences et des offres de services ;
- Qui peut éventuellement se reproduire ;
- Dont le comportement tend à satisfaire ses objectifs, en tenant compte des ressources et des compétences dont elle dispose, et en fonction de sa perception, de ses représentations et des communications qu'elle reçoit.

Mazyad (2013) a ajouté d'autres caractéristiques telles que :

- La rationalité: agents rationnels doivent évaluer leurs actions et de choisir les meilleurs critères pour atteindre l'objectif;
- L'anticipation: l'agent a plus ou moins la capacité d'anticiper les événements futurs;

- L'adaptabilité ou la flexibilité: un agent d'adaptation est un agent capable de modéliser ses capacités en fonction des conditions environnementales. L'agent est capable d'apprendre et de savoir comment résoudre un nouveau problème de l'expérience.

2.1.2. Types d'agents

Wooldridge (2002) définit trois classes d'agents:

- **Les agents cognitifs** (délibératifs): sont les agents possédant des intentions et des objectifs à atteindre. Ils sont dotés d'une représentation interne symbolique de leur environnement ayant des mécanismes de prises de décision et ils sont capables de tenir compte de leur passé. Ces caractéristiques leur permettent de planifier les actions à entreprendre pour atteindre les objectifs fixés. Les systèmes cognitifs comprennent un petit nombre d'agents, qui disposent d'une capacité de raisonnement sur une base de connaissances, d'une aptitude à traiter des informations diverses liées au domaine d'application, et d'information relatives à la gestion des interactions avec les autres agents et l'environnement (Erceau and Ferber, 1991). Les agents sont intentionnels, ils possèdent des buts et des plans explicites permettant d'atteindre leurs buts (Chaib-Draa *et al.,* 1992).

- **Les agents réactifs:** sont des agents n'ayant aucune représentation interne de leur environnement. Leur fonctionnement est du type stimulus/réponse. Ils réagissent en fonction de leur perception de l'environnement et d'un ensemble de règles préétablies qui associent une action à chaque perception. Les agents réactifs sont des agents passifs qui répondent seulement à un stimulus. Ils ne disposent pas de module de raisonnement interne (Zgaya, 2007). Les actions rapides et non-réfléchies des agents réactifs sont similaires à des réflexes (Kamoun, 2007).

- **Les agents hybrides:** sont des agents cognitifs dotés de capacités de réactions aux événements. Le système réactif assure la réalisation des activités-réflexes en réponse aux stimuli de l'environnement et le système cognitif réalise les activités basées sur la planification et la délibération, nécessitant la mise en œuvre de raisonnements complexes.

Le tableau suivant présente une comparaison entre agents cognitifs et agents réactifs (Hassaine, 2009):

TABLEAU V. 1. COMPARAISON ENTRE AGENTS COGNITIFS ET AGENTS RÉACTIFS.

Systèmes d'Agents cognitifs	Système d'Agents Réactifs
Présentation explicite de l'environnement	Pas de représentation
Peut tenir compte de son passé	Pas de mémoire de son historique
Agents Complexes	Fonctionnement stimulus/action
Petit nombre d'agents	Grand nombre d'agents

2.1.3. Quelques architectures Agents

L'architecture d'un agent est une description de son organisation interne qui se manifeste dans les données et les connaissances de l'agent, les opérations qui peuvent être effectuées sur ses composantes et le flux de contrôle des opérations. Le choix d'une architecture ou d'une autre est lié à la structure conceptuelle de l'agent et représente la décision du concepteur sur la façon de bâtir l'agent artificiel. Les architectures d'agent les plus connues sont les suivantes :

- **Les agents logiques:** fonctionnement basé sur des déductions logiques.
- **Les agents réactifs:** fonctionnement basé sur une simple correspondance entre les situations et les actions (interagissent avec leur environnement mais sans raisonner dessus).
- **Les agents multi-niveaux:** les connaissances internes de ce type d'agents sont organisées en différents niveaux d'abstractions, permettant ainsi différents niveaux de traitement.
- **Les agents BDI:** l'agent décide des actions à entreprendre à partir de ses états internes qui sont exprimés sous la forme de croyances (Belief), de désirs (Desire) et d'intentions (Intention).
  - ✓ *Believes:* informations (faits) courantes qu'un agent possède à propos de l'environnement.
  - ✓ *Desires:* buts à réaliser si possible. C'est la description du comportement désiré de l'agent en termes de satisfaction, de maintenance ou de vérification de propriétés.
  - ✓ *Plans:* connaissances qui déterminent comment certaines séquences de tests et d'actions permettent d'atteindre des buts ou bien réagir à certaines situations. Plan= (condition d'invocation, condition sur le contexte, plan: when event if condition then action).
  - ✓ *Intentions:* plans (et donc but) instancié choisis pour une (éventuelle) exécution.

2.2. Système Multi-Agents

2.2.1. Définition et caractéristique

Un SMA est un ensemble d'agents évoluant au sein d'un même environnement. Il fournit des moyens de communication aux agents, qui interagissent afin d'effectuer les tâches globales du système (Wooldridge *et al.,* 1998). Les SMA sont des entités qui interagissent pour produire un comportement collectif. Ces derniers permettent de "réduire la complexité de la résolution d'un problème en divisant le savoir nécessaire en sous-ensembles, en associant un agent intelligent indépendant à chacun de ces sous-ensembles et en coordonnant l'activité de

ces agents" (Ferber, 1995). Un SMA pourrait être défini comme un ensemble organisé d'agents qui sont responsables de la réalisation d'un objectif commun (Briot *et al.,* 2001). En effet, les Systèmes Multi-Agents sont des systèmes distribués idéalement adaptés comme un ensemble d'agents qui interagissent selon des mécanismes de coopération, de coordination, de négociation ou de communication (Chaib-draa *et al.,* 2002).

- **Coopération entre agents :**

La coopération est une des principales caractéristiques des SMA. Elle consiste en une participation de plusieurs agents dans une activité, dans le but d'atteindre un objectif commun (Wooldridge, 2002; Chaib-draa *et al.,* 2001).

Elle peut se faire à travers deux modèles selon (Wooldridge, 2002):

- *Coopération par partages de tâches*: consiste en une décomposition du problème principal en un ensemble de sous-problèmes moins complexes, puis en la répartition de ces sous-problèmes entre les différents agents. Cette allocation se fait généralement par des mécanismes d'appels d'offres tel que le Contract Net (Smith, 1980 ; Wooldridge, 2002) ou directement par un agent supérieur qui maîtrise les compétences de chacun des agents du système. ou

- *Coopération par partages de résultats*: implique un partage des informations liées aux sous-problèmes. Ce partage d'information peut se faire d'une manière proactive (un agent qui envoie des informations à un autre en croyant que cela peut lui être utile) ou d'une manière réactive (un agent qui envoie des informations en réponse à une requête qui lui a été adressée).

- **Coordination entre agents :**

La coordination porte sur l'organisation des activités des agents de manière à prévenir l'anarchie et le chaos et à exploiter les interactions bénéfiques (Nwana *et al.,* 1996 ; Chaib-draa *et al.,* 2001).

Parmi les principales approches utilisées pour coordonner les activités d'agents, on trouve selon (Wooldridge, 2002):

- *La coordination par « planification partielle globale » (PGP : Partial Global Planning):* chaque agent génère des plans à court terme qui indiquent les actions futures à entreprendre pour atteindre ses objectifs. Ces plans sont partagés entre les agents dans le but d'identifier les améliorations potentielles à apporter à la coordination et ainsi d'éviter des actions inconsistantes ou contradictoires. En cas de nécessité, ces plans locaux peuvent être modifiés ;

- *La coordination par intentions communes*: les SMA sont considérés comme une équipe de travail dont les membres peuvent générer une intention commune d'exécuter une activité commune.

- **Négociation entre agents:**

La négociation est un processus itératif correspondant au dialogue entre agents pour concilier des points de vue ou des intérêts divergents et pour atteindre un compromis sur la manière dont les agents doivent agir ensemble.

(Wooldridge, 2002) définit ce processus à travers quatre composantes :

- Un ensemble de négociations, en d'autres termes, un ensemble de propositions que les agents peuvent manipuler;
- Un protocole d'actions possibles ;
- Un ensemble de stratégies spécifiques à chacun des agents ;
- Une règle qui précise l'atteinte de l'accord ou à défaut l'expiration du temps.

- **Communication entre agents :**

L'interaction se fait par le biais d'une communication structurée ou d'échanges d'information selon différentes manières. Dans la communauté agent, l'intention de communiquer est de produire un effet sur les destinataires: ils exécuteront probablement une action demandée par l'émetteur ou répondront à une question (Huget, 2005).

La communication peut être catégorisée dans deux grandes classes:

- *La communication indirecte*: se fait par le biais de l'environnement (action non intentionnelle) en laissant des traces ou des signaux; ou par le biais d'un tableau noir (action intentionnelle) en déposant et en lisant des informations déposées dans une zone de données partagée. Dans ce genre de communication, les destinataires ne sont pas définis.
- *La communication directe*: se fait d'une manière intentionnelle par envoi de messages à un ou plusieurs destinataires bien définis.

Le langage de communication permettant de structurer les messages échangés entre les agents.

Les protocoles de communication les plus utilisés et les plus connus sont:

- ✓ KIF (Knowledge Interchange Format);
- ✓ KQML (Knowledge Query and Manipulation Language);
- ✓ FIPA-ACL (Agent Communication Language) qui s'est inspiré de KQML.

KQML et FIPA-ACL sont basés sur la théorie des actes de langages (Austin, 1962) et (Searle, 1969): les messages sont des actions ou des actes communicatifs.

Les systèmes multi-agents (SMA) ont montré leur pertinence pour la conception d'applications distribuées (Logiquement ou physiquement), complexes et robustes. Le concept d'agent est aujourd'hui plus qu'une technologie efficace, il représente un nouveau paradigme pour le développement de logiciels dans lesquels l'agent est une entité autonome qui possède un objectif, évolue dans un environnement dynamique et interagit avec d'autres agents au moyen de langages et de protocoles (Gleizes *et al.,* 2009). Les systèmes multi-agents ont pour objectif principal de résoudre un problème en proposant des solutions robustes et capables de s'adapter dans des environnements et de représenter des phénomènes complexes difficiles, voire impossibles, à modéliser en utilisant des outils et méthodes analytiques.

2.2.2. Environnement des SMA

On appelle système multi-agent (ou SMA), un système composé des éléments suivants (Ferber, 1995):

- *Un environnement E:* Un espace disposant généralement d'une métrique.
- *Un ensemble d'objets O:* Ces objets sont situés pour tout objet, il est possible à un moment donné, d'associer une position dans E. Ces objets sont passifs, c'est à dire qu'ils peuvent être perçus, crées, détruits et modifiés par les agents.
- *Un ensemble A d'agents:* représentent les entités actives du système.
- *Un ensemble de relations R:* unissent les objets et les agents entre eux.
- *Un ensemble d'opérations Op:* permettant aux agents A de percevoir, produire, consommer, transformer et manipuler les objets de O.
- *Des opérateurs chargés de représenter l'application de ces opérations* et la réaction du monde à cette tentative de modification, que l'on appellera les lois de l'univers.

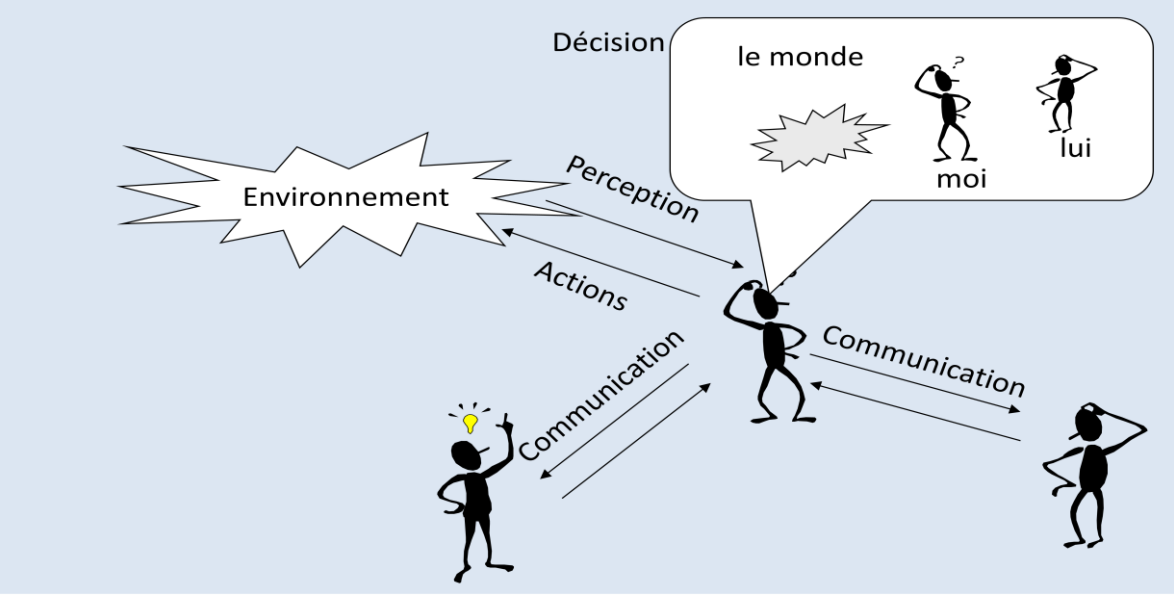


Figure V. 2. Représentation d'un agent en interaction avec son environnement et les autres agents.

Conformément à la norme FIPA 2000, l'environnement est défini comme l'ensemble de tous les éléments ou objets extérieurs à l'agent, y compris les évènements faisant intervenir un agent ou un groupe d'agents. Ces éléments définissent un espace commun d'action aux agents.

On distingue deux types d'environnement :

L'environnement social: correspond aux autres agents avec lesquels un agent est en interaction par envoi de messages.

L'environnement physique: correspond aux ressources matérielles que l'agent peut percevoir et sur lesquels il peut agir. Par exemple dans une société de fourmis, l'environnement est composé d'obstacles et de nourritures (Drogoul, 1993).

2.2.3. Applications des SMA dans le domaine industriel

Aujourd'hui, plusieurs chercheurs ont adopté l'approche multi-agent pour modéliser, simuler et résoudre des différents problèmes rencontrés dans l'industrie, tels que: la gestion de crise (Lachtar *et al.,* 2012; Magarino *et al.,* 2013), gestion de production (Sacile *et al.,* 2004; Karuna *et al.,* 2005; Guo et Zhang, 2009; Behdani *et al.,* 2010; Yeung, 2011; Kruger *et al.,* 2011), simulation de la chaîne logistique (Fung et Chen, 2005; Shen *et al.,* 2006; Monostori *et al.,* 2006; Labarthe, 2007; Frayret *et al.,* 2008; Tounsi, 2009; Jianxi *et al.,* 2012), gestion des risques dans les chaînes logistiques (BenKahla, 2011; Giannakis *et al.,* 2011) et particulièrement dans le domaine de la maintenance. Exemple des problèmes où l'approche multi-agent a été adoptée sont : les problèmes de planification et d'ordonnancement (Zhou *et al.,* 2004; Marmier *et al.,* 2009; Khelifati et al., 2011; Kaplanoglu, 2014), ordonnancement des ressources (Sabar *et al.,* 2009; Aissani *et al.,* 2009; Bouzidi-Hassini *et al.,* 2015), les problèmes d'organisation de maintenance et la réparation des équipements (Kaegi *et al.,* 2009; Kizim *et al.,* 2013; Rezki *et al.,* 2013; Panteleev *et al.,* 2014).

Bouzidi-Hassini et Kaplanoglu présentent dans leurs travaux (Kaplanoglu, 2014; Bouzidi-Hassani *et al.,* 2015), un état de l'art des recherches existantes appliquant des systèmes multi-agents pour résoudre des problèmes de maintenance.

2.2.4. Intérêts et choix des SMA

La modélisation multi-agents est une méthode informatique permettant de modéliser des systèmes complexes. Les modèles à base d'agents sont composés d'agents qui sont des entités informatiques qui ont des propriétés, ou des variables d'état et des valeurs (par exemple, la position, la vitesse, l'âge, la richesse, etc.). Un agent peut représenter un élément d'un système. L'objectif de la modélisation à base d'agents est de créer des agents et des règles qui permettront de générer un comportement visé. Ils peuvent être utilisés pour comprendre un phénomène par l'expérimentation avec des règles et des propriétés. Ils ont aussi comme objectif de modéliser des systèmes hétérogènes, complexes, non linéaires et évolutifs, pour faire apparaître une intelligence et des capacités qui sont différentes de celles des agents qui les composent. Cette intelligence émerge de la coexistence et de la coopération d'agents

autonomes. En effet, les systèmes multi-agents sont l'outil approprié pour étudier la complexité et les différentes interactions entre plusieurs entités et de les simuler. Ces systèmes sont utilisés pour résoudre divers problèmes dans la réalité et adapté à la modélisation de systèmes complexes.

Les SMA sont efficaces grâce à leurs réactivités et leurs autonomies dans la résolution de divers problèmes de la vie réelle ; ils sont, donc, plus appropriés pour modéliser la maintenance comme un système complexe par rapport à d'autres méthodes telles que le modèle de Markov, la simulation par les réseaux de Petri ou la simulation Monte-Carlo (Kaegi *et al.,* 2009; Aissani *et al.,* 2015).

Le choix d'une approche multi-agent peut être justifié par l'adaptation à la réalité. En effet, elle donne une représentation simple et de haute qualité de la réalité. Elle permet également la spécification des caractéristiques de problèmes complexes afin de résoudre et faciliter la représentation des systèmes complexes (Wilensky and Rand, 2015; Scchi and Neumann, 2016). En outre, le SMA est défini comme un modèle de référence pour identifier les dysfonctionnements, et les besoins d'un système étudié pour prendre une bonne décision.

3. LES MÉTHODES DE CONCEPTION DES SYSTÈMES MULTI-AGENTS

Le développement d'un SMA nécessite l'application d'une méthodologie qui est une démarche commençant par la définition des besoins primordiaux du concepteur afin d'arriver à une implémentation d'un système capable de satisfaire les besoins initiaux.

La littérature fait état d'un ensemble des méthodes de développement orientées agent qui peuvent être classées selon trois axes (Jarras *et al.,* 2002 ; Gleizes *et al.,* 2009):

- Les extensions d'approches orientées objets :

  - ✓ AAII : Australian Artificial Intelligence Institute Methodology (Kinny, 1996). Elle a été développée pour la gestion du trafic aérien et dédiée à la conception d'agents BDI.

  - ✓ GAIA: est une extension des approches d'ingénierie logicielles classiques (Wooldridge *et al.,* 2000). C'est une méthode parmi les méthodologies les plus citées dans la littérature. Toutefois, les ressources disponibles sur GAIA sont assez limitées. Elle est limitée aux applications à agents de forte granularité, peu nombreux, et avec une organisation statique.

  - ✓ AALAADIN: est un cadre de développement de système multi-agents développé par (Ferrand and Deffuant, 1998). Cette méthode représente un environnement de prototypage et d'exécution idéal pour des agents reposant sur les notions de groupe et de rôle. Elle s'intéresse à la conception et la réalisation des SMA dans une perspective organisationnelle.

- ✓ ADELFE : Atelier de DEveloppement de Logiciel à Fonctionnalité Emergente (Picard and Gleizes, 2004) est une méthode dédiée à la conception de SMA adaptatifs. Les logiciels adaptatifs sont utilisés lorsque l'environnement est imprévisible ou le système à construire est ouvert. Le processus d'ADELFE s'inscrit dans un processus issu de l'ingénierie orientée objet. Elle cherche à réaliser les buts locaux du système et ignore le but global.

- Les approches dérivées de l'ingénierie de la connaissance:

  - ✓ DESIRE: Design and Specification of Interacting REasoning framework (Brazier *et al.*, 1997). DESIRE est une méthode issue directement de l'ingénierie de connaissances qui manipule les structures de connaissances, les décompositions de tâches, les échanges d'information, l'ordonnancement et la délégation de tâches.

  - ✓ MAS-CommonKADS: est une extension de CommonKADS qui ajoute, à des techniques venant des méthodes orientées objet, des techniques de conception des protocoles dans le but de modéliser les agents et les interactions entre eux (Iglesias *et al.,* 1998).

- Les méthodes moins classiques qui proposent de prendre dès le départ un point de vue centré sur la notion de système multi-agents, ce qui permet d'éviter de passer sous silence les aspects sociaux ou d'émergence de comportement comme:

  - ✓ VOYELLES: Cette approche de Demazeau (2001) est fondée sur la décomposition d'un système multi-agents en quatre composantes ou briques (A, E, I, O): Agent, Environnement, Interaction, Organisation. C'est une méthode de haut niveau très souvent citée dans la documentation car elle repose sur des principes purement multi-agents.

  - ✓ CASSIOPEE: est une méthode issue du domaine de la simulation multi-agents développée par Collinot et Drogoul (1998). C'est une méthode ascendante, qui part des actions nécessaires à l'obtention d'une tâche globale pour arriver à la définition des rôles organisationnels et structures collectives.

Il n'existe pas une méthode dite parfaite qui guide le concepteur de l'analyse à l'implémentation. Chacun choisit la méthode la plus adaptée à son besoin et selon son objectif qui veut atteindre. En outre, il aurait intéressant d'avoir des plateformes d'exécution associées à des méthodes de conception, ce qui n'est pas le cas jusqu'à présent.

4. LES PLATEFORMES DES SYSTÈMES MULTI-AGENTS

La simulation multi-agent consiste à utiliser un ensemble d'agent en interaction entre eux pour reproduire la dynamique et évaluer les phénomènes qu'on voudrait simuler. Elle est considérée comme une alternative à la simulation classique, basée sur des modèles

analytiques. L'exécution et le déploiement des agents se fait à travers des plateformes dédiées et à base d'agent.

La plateforme à base d'agent est définie comme tout logiciel, application ou environnement de développement qui fournit des agents constructeurs avec un niveau suffisant d'abstraction pour leur permettre de mettre en œuvre des agents intelligents avec des attributs, caractéristiques et règles souhaitées.

Une plateforme de développement des systèmes multi-agents est une infrastructure logicielle utilisée comme un environnement de déploiement et de l'exécution pour un ensemble d'agent. Il devrait fournir une fonctionnalité confortable pour créer et tester des agents ; il peut être vu comme un ensemble de services pour les développeurs, mais aussi pour les agents en cours d'exécution. Cependant, une plateforme est un environnement d'exécution pour un agent dans le sens où il est prévu de créer, exécuter et supprimer des agents. D'autre part, une plate-forme devrait agir en tant que médiateur entre le système d'exploitation et les applications (Banks, 1998; Banks *et al.*, 2005; Grigoriev, 2015).

Il existe différentes catégories de plateformes à base d'agents, ils recueillent des outils de différentes natures pour un certain générique et sont utilisés dans le développement de SMA (Bakhta, 2013):

- Plateforme de simulation : reproduit l'environnement ou le comportement d'un système complexe afin d'en étudier la dynamique ;
- Plateforme d'exécution : propose des outils d'implémentation à partir de modèles particuliers ;
- Plateforme de développement : fournit un support pour une méthodologie en fournissant des outils pour assister une démarche de conception.

Plusieurs études ont abordé et présenté les plateformes à base d'agents tels que (Gutknecht and Ferber, 2000; Bellifimine *et al.*, 2003; Tisue and Wilensky, 2004; Acronymics., 2004; Luke *et al.*, 2005; LePage and Bousquet, 2007; Swarmfest 2012 ; Borchtchev, 2013; Grignard *et al.*, 2013). D'autres travaux comme (Bakhta, 2013 ; Naciri and Tkiouat, 2015a) ont exposé une revue de littérature des différentes plateformes existantes. Naciri and Tkiouat (2015a) ont détaillé davantage les plateformes les plus connues dans la littérature.

Le tableau ci-dessous (tableau V.2) montre une comparaison entre les plateformes les plus utilisées pour les SMA :

TABLEAU V. 2. COMPARAISON ENTRE LES DIFFERENTES PLATEFORMES DE SMA.

Platform	Developer	Category			Language	Features			Primary Domain	Support	Agents Types	
		Development	Simulation	Execution		Interface	GIS	3D			Cognitive	Reactive
AgentBuilder		-	-	✓	Java	✓	-	-	General purpose MAS	+++	✓	-
AnyLogic	The AnyLogic Company 2000	-	✓	-	Java, UML-RT	✓	✓	✓	Agent-based general purpose; also supports discrete event and system dynamics simulations	+++++	✓	✓
Cormas	Agronomy research institute CIRAD	-	✓	-	Smalltalk	✓	✓	-	Natural resources management, Rural development, Ecology.	+++	✓	✓
Flame	Sheffield University	-	✓	-	C and XML	-	✓	✓	Simulations of large	+++	-	-
GAMA	IRD/UPMC International Research Unit UMMISCO	-	✓	-	A modeling language	✓	✓	✓	Building spatially explicit Agent-based simulation.	++	-	-
JADE	Telecom Italia Lab	✓	-	-	Java	✓	-	-	Distributed applications composed of autonomous simulations.	+++	✓	-
JANUS	Research Center for Advanced Technologies Tucumán (SICTA) in Argentina.	-	✓	-	Java 1.6	✓	-	-	General purpose MA platform with agent based, organizational and holonic simulation layer.	++	-	✓

MadKit	GutKnecht, 2000	-	-	✓	Java	✓	-	-	General purpose agent-based simulation	++	✓	-
MASON	University of Salerno	-	✓	-	Java	✓	✓	✓	Machine learning, Social complexity, Physical modelling	++	-	-
NetLogo	Uri Wilensky 1999	-	✓	-	NetLogo	✓	✓	✓	Social and natural sciences	++++	-	✓
Repast	University of Chicago	-	✓	-	Java	✓	✓	✓	Social sciences	+++	-	-
Swarm	Santa Fe Institute	-	✓	-	Java, Objective C	✓	-	-	General purpose agent-based	++	-	✓
Zeus	Lee et al., 1998	✓	-	-	Visual editors and code generators	✓	-	-	Rules engine and scripting environment, Distributed MAS	+	✓	-

- : Non, inconnu;

✓ : Oui;

+++++: Documentations (articles, vidéos,..), Exemples, Tutoriels, Forum, Mode d'emploi.

Le tableau V.2 ci-dessus présente un comparatif des différentes plateformes multi-agents fréquemment utilisés. Cette comparaison est effectuée à un niveau qualitatif en utilisant les critères sélectionnés. Cette comparaison permet de montrer les propriétés de chaque plateforme étudiée. A partir de cette comparaison, nous constatons que les plateformes dédiées pour la simulation avec des caractéristiques différentes (interface, SIG, 3D) et une large documentation sont les plateformes AnyLogic et NetLogo. Cependant, NetLogo est consacré plus pour les domaines sociaux tandis que la plateforme AnyLogic est plus efficace pour les problèmes industriels et prend également en charge les événements discrets, et les simulations de la dynamique des systèmes.

5. LA PLATEFORME ANYLOGIC®

5.1. Définition

AnyLogic est une plateforme de simulation dynamique pour les systèmes de type discrets, continus et hybrides, ainsi que pour le développement des modèles déterministes, stochastiques ou des systèmes à base d'agents (Borchtchev *et al.*, 2002). AnyLogic inclut un langage de modélisation graphique facilitant la construction des modèles. Cette plateforme permet à l'utilisateur d'effectuer des modèles de simulation personnalisés grâce à son grand éditeur graphique, sa représentation visuelle et d'animation (2D et 3D) des différentes entités de simulation. C'est un outil basé sur l'approche orienté objet, et tous ses éléments de simulation et d'animation sont développés dans un langage de programmation Java.

AnyLogic est une plateforme qui réunit les différentes approches de modélisation-simulation: Dynamique des Systèmes, Evénements Discrets, Systèmes Multi-Agents (SMA), avec toutes variantes possibles, et cela au moyen d'un seul langage de modélisation et au sein d'un seul environnement de développement de modèle permettant la diminution de temps et du coût de développement des modèles (Borchtchev, 2013). La souplesse du langage d'AnyLogic permet de modéliser la complexité et l'hétérogénéité des opérations (opérations courantes, économie, social, etc.) avec tous les niveaux de détails souhaités. Les fondamentaux du langage de modélisation et les objets de la bibliothèque d'AnyLogic permettent de modéliser la production et la logistique, les processus courants, les ressources humaines, le comportement de consommateurs et de patients, et l'environnement et leur interaction naturelle.

5.2. Avantages de la plateforme AnyLogic

AnyLogic révèle plusieurs avantages :

- *Temps de développement court:* grâce à son environnement de programmation graphique et ses bibliothèques d'objets prédéfinis et personnalisés où possible d'utiliser des objets préprogrammés, en les connectant les uns les autres et en modifiant leurs propriétés, dans le but de n'avoir que peu de ligne de programmation.

- *Coût de développement faible :* AnyLogic est une structure complètement orienté-objet.

- *Un seul langage pour plusieurs modèles :* elle combine différentes approches (DS, SED, SMA), pour des simulations continues et discrètes, des simulations d'incertitudes et de statistiques, et des simulations de type Monte-Carlo (méthode vise à calculer des valeurs numériques en utilisant des procédés aléatoires et des techniques probabilistes) et des opérations d'optimisation (méthodes visent à trouver le maximum de performance en termes de précision, mémoire, temps, etc.).

- *Des animations 2D et 3D pour les modèle*s: des simulations visuellement riches et interactives et la création d'applets permet la distribution et la mise sur le web.

5.3. Applications de la plateforme AnyLogic

La plateforme AnyLogic est appliquée par plusieurs domaines tels que: simulations de la santé et les produits pharmaceutiques (Osgood and Liu, 2014; Djanatliev and German, 2015), la science et l'éducation (Groner *et al.,* 2013; Lynch *et al.,* 2014), les systèmes d'énergie (Mazhari *et al.,* 2009; Bazan and German, 2012), militaire, la défense, la sécurité (Kim *et al.,* 2013; Nguyen *et al.,* 2015), l'industrie, etc...

5.4. Intérêts et choix de la plateforme AnyLogic

AnyLogic est la première plateforme et le seul outil de simulation dynamique qui rassemble et combine trois approches de modélisation-simulation différentes: la dynamique des systèmes, les événements discrets et les systèmes multi-agents (SMA) (Borchtchev *et al.,* 2002; 2013). AnyLogic est la plateforme la plus appropriée pour la modélisation des problèmes industriels particulièrement celles de la chaîne d'approvisionnement (Almender and Preusser, 2007; Kim *et al.,* 2013; Barahona *et al.,* 2013; Yuan and Ponsignon, 2014).

Le choix abat sur la plateforme AnyLogic, car elle est capable de modéliser plus précisément les problèmes industriels comme la fabrication, la logistique et les chaînes d'approvisionnement (Almeder and Preusser, 2007; Jinks *et al.,* 2010; Kim *et al.,* 2013; Barahona et al. 2013; Felberbauer *et al.,* 2014), ainsi que le domaine de la maintenance (Sabar *et al.,* 2008 ; Gallab *et al.,* 2016b). De plus, AnyLogic fournit des tutoriels qui sont intégrés dans la plateforme et qui traitent des questions de maintenance telles que « Wind Turbine Maintenance ». En outre, les distributions de probabilité (Weibull, Exponentielle, PERT, distribution triangulaire ...) sont bien définies par défaut dans cette plateforme par rapport aux autres plateformes qui nécessitent une programmation de la distribution pour l'utiliser.

6. L'ARCHITECTURE DU MODÈLE PROPOSÉ

La simulation par les systèmes multi-agents est utilisée pour analyser et simuler les différentes interactions entre agents autonomes d'un système global. La simulation à base d'agents est utilisée pour modéliser certaines parties du monde réel et des systèmes complexes.

Les SMA ont montré leur pertinence pour la conception des applications distribuée (logiquement ou physiquement), complexe et robuste (Gordan *et al.,* 2014; Wilensky and Rand, 2015). Le concept d'agent est maintenant plus d'une technologie efficace; elle représente un nouveau paradigme pour le développement logiciel dans lequel l'agent est une entité autonome avec un objectif. En fait, l'agent opère dans un environnement dynamique et interagit avec d'autres agents en utilisant des langages et protocoles (Gleizes *et al.,* 2009).

L'objectif principal des Systèmes Multi-Agents est de trouver une solution globale aux problèmes globaux et la modélisation des systèmes hétérogènes, complexes, non linéaires et évolutifs avec un ensemble d'entités appelés agents. Cette approche offre des solutions robustes et adaptables dans des environnements qui peuvent être imprévisibles.

6.1. Objectif du modèle proposé

L'objectif d'utilisation des SMA dans notre travail consiste à :

- Présenter une application de l'approche de simulation multi-agent pour maîtriser les risques dans les activités de maintenance ;
- Concevoir un SMA pour assurer la sécurité et éviter les défaillances probables lors de la réalisation d'une tâche de maintenance ;
- Réaliser un système qui permet de calculer les indicateurs de performances liés à la maintenance.
- Assurer l'optimisation des ressources lors de la réalisation de la tâche de maintenance.

6.2. Architecture technique pour la conception d'un SMA

Le modèle proposé vise à fournir un modèle de maîtrise des risques dans les activités de maintenance basée sur les systèmes multi-agents pour faciliter la modélisation du système et de gérer les interactions entre ses différents acteurs. Ce système interactif est composé de quatre parties comme représenté sur la figure V.3:

- **Interface Utilisateur :** Moyen de communication entre l'utilisateur et le SMA. L'utilisateur saisit les paramètres nécessaires pour la simulation et récupère à la fin des résultats du système.
- **Base de données :** Contient toutes les informations nécessaires pour la simulation et les résultats obtenus à partir du noyau fonctionnel. Cette BDD est conçu à partir d'un diagramme de classe du modèle MOSAR-UML (présenté dans le chapitre IV) (Gallab *et al.*, 2015b; 2017).
- **Noyau Fonctionnel « SMA »:** effectue diverses opérations, prend des décisions appropriées et les enregistre dans la base de données.
- **KPI :** affiche les indicateurs de performance résolus par les SMA.

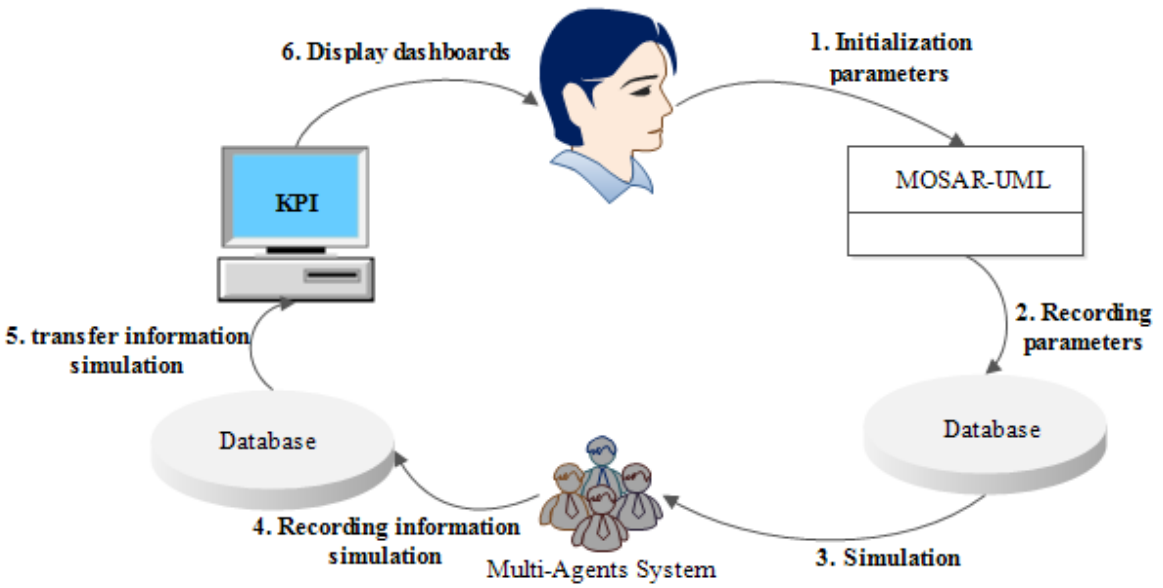


Figure V. 3. Architecture Technique pour la conception d'un SMA (Gallab *et al.*, 2015a).

La figure V.3 représente le flux d'informations du modèle basé sur les systèmes multi-agents qui est une aide à la décision pour la maîtrise des risques dans les activités de maintenance. Le parcours de la simulation commence avec les paramètres d'initialisation suivie d'une modélisation MOSAR-UML pour concevoir une base de données. Les données stockées dans la base de données seront utilisés par le système multi-agents pour lancer la simulation. Les résultats de simulation seront enregistrés dans la base de données que seront affichées à la fin sous forme de tableau de bord.

6.3. Méthode de conception d'un SMA

Pour concevoir et développer un SMA, il existe plusieurs méthodologies qui proposent différents approches et modèle pour faciliter ce développement.

La conception d'un SMA exige souvent la définition d'un modèle du domaine, d'un modèle d'organisation et d'un ou plusieurs modèles d'agent. Pour cette raison, nous avons opté et adopté l'approche « VOYELLE » de l'équipe MAGMA (Demazeau, 1995). Cette approche est fondée sur la décomposition d'un système multi-agents en quatre composantes ou briques (A, E, I, O) : Agent, Environnement, Interaction, Organisation.

Le SMA obtenu est défini comme suit :

SMA = Agents + Environnement + Interactions + Organisation

Les dimensions sont :

- **Agents:** Cette partie regroupe les éléments nécessaires à la construction des agents, à savoir leur modèle, leur architecture et leur implémentation.
- **Environnement:** représente le milieu dans lequel sont plongés les agents. Il est généralement spatial dans la plupart des applications multi-agents.
- **Interactions:** concernant les infrastructures, les langages et les protocoles d'interaction entre agents, depuis de simples interactions physiques à des interactions langagières par actes de langages.
- **Organisation:** structure les agents en groupes, hiérarchies, relations, etc… L'organisation décrit le cadre dans lequel les agents, les ressources, les tâches et les buts coexistent. Elle assure donc un certain ordre entre entités éventuellement hétérogènes, lequel concourt à la cohérence du tout (Ferber, 1995).

6.3.1. Les Agents

La maîtrise des risques liés aux activités de la maintenance en vue de la modélisation par un SMA a montré que les agents que constitue ce système doivent être Hybride (Réactif et Cognitif) car ils doivent posséder des compétences et un savoir afin de prendre la bonne décision.

La figure V.4 illustre l'architecture générale du SMA. Sur cette figure nous avons considéré un acteur qui est en interaction avec les agents : l'utilisateur de maintenance (Responsable de maintenance ou autre).

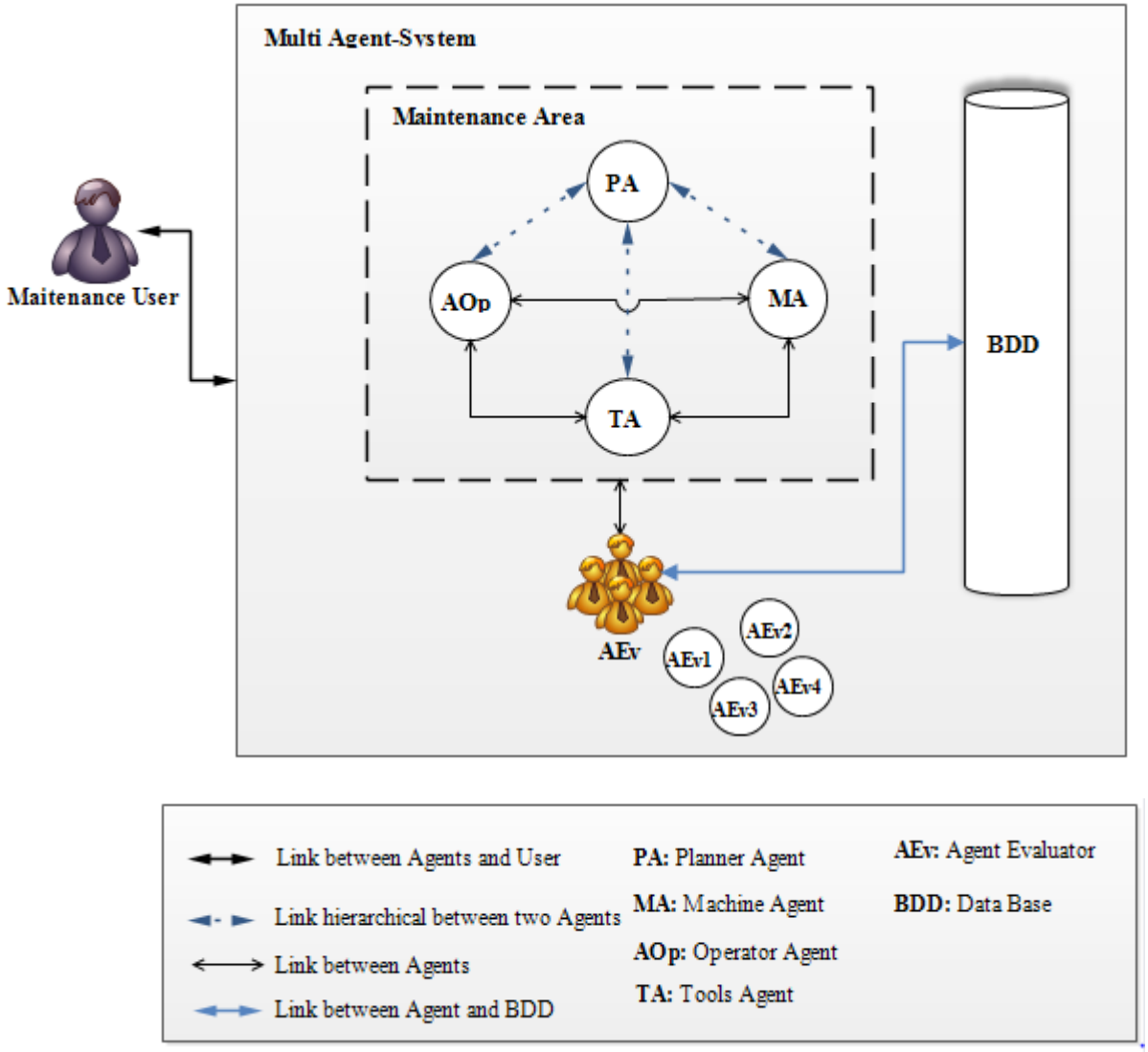


Figure V. 4. Architecture générale du SMA (Gallab *et al.*, 2016a).

Le SMA proposé contient un acteur : « l'utilisateur de maintenance ». Son rôle est de saisir les paramètres et les informations nécessaires pour lancer la simulation. Après, il lance la simulation pour avoir les informations générales sur la tâche de maintenance.

La figure V.5 présente un diagramme de cas d'utilisation qui décrit les interactions entre l'utilisateur de la maintenance et le système.

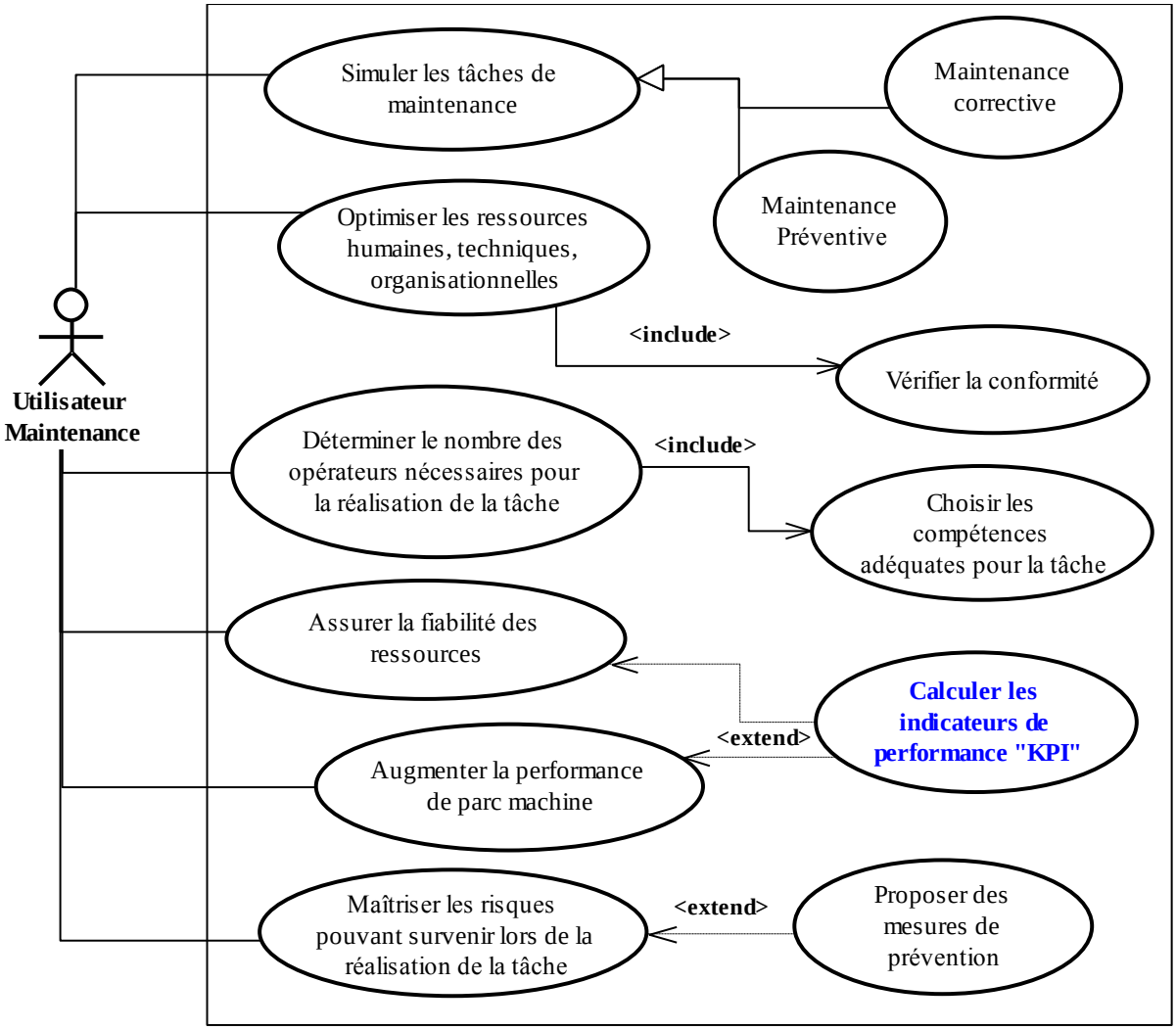


Figure V. 5. Diagramme de Cas d'utilisation qui décrit les interactions entre l'utilisateur de maintenance et le système.

Le système permet à l'utilisateur de maintenance de simuler une tâche de maintenance qui peut être une tâche préventive ou corrective. Il lui permet de déterminer le nombre de ressources (techniques, humaines et organisationnelles) nécessaires à la réalisation d'une tâche de maintenance en vérifiant leur conformité et en choisissant les bonnes compétences afin d'optimiser et d'assurer la fiabilité de ces ressources en affichant des indicateurs de performance. Ce système permet également de simuler les scénarios de défaillance et réaliser une analyse des risques afin de maîtriser les risques pouvant survenir lors de la réalisation de la tâche de maintenance.
Les agents du système comme illustrés dans l'architecture (Fig. V.4) sont :

- **PA: Planner Agent ou Agent Planificateur** ; L'Agent Planner permet d'organiser le processus d'une tâche de maintenance soit selon un ordre d'intervention pour la maintenance corrective ou par un planning concernant la maintenance préventive.

Cet agent permet de réaliser les missions suivantes:

- ✓ La définition du nombre des ressources nécessaires pour réaliser la tâche de maintenance ;

- ✓ La définition de la durée de l'intervention de la maintenance ;
- ✓ La planification de la priorité d'une tâche ou une intervention de maintenance par rapport à une autre en cas de la non disponibilité de certaines ressources.
- ✓ Le calcul du temps Moyen d'indisponibilité de la machine.

- **MA: Agent Machine;** cet agent permet d'identifier le comportement et l'état de la machine et son mode de fonctionnement (Fonction Normal, Fonction dégradé, nécessitant une maintenance préventive ou en panne).

L'agent Machine définit aussi la nature de la machine (Electrique, Mécanique, Pneumatique, ...). Il permet de calculer les indicateurs de performance liés à la sûreté de fonctionnement de la machine (Fiabilité, Maintenabilité, Disponibilité, Sécurité).

L'agent Machine permet d'avoir les indicateurs de performance suivants :

- ✓ La fiabilité caractérisée par la MTBF (Moyenne des Temps de Bon fonctionnement) ;
- ✓ La maintenabilité caractérisée par la MTTR (Mean Time To Repair);
- ✓ La disponibilité ;
- ✓ Le taux de défaillance ;
- ✓ Le niveau de risque caractérisé par la criticité.

- **AOp : Agent Opérateur** ; décrit le comportement d'un opérateur qui se déplace vers une machine nécessitant une intervention selon un ordre d'intervention ou un planning et revient à l'atelier après l'exécution de la tâche de maintenance. L'agent Opérateur permet de voir la disponibilité des opérateurs, le nombre nécessaire pour la réalisation d'une tâche et les compétences adéquates.

On simule le choix et l'intérêt d'une compétence en fonction de la nature de la tâche de maintenance. Par exemple, la maintenance d'une machine électrique nécessite l'intervention d'un opérateur ayant une compétence dans le domaine électrique.

L'agent Opérateur permet de calculer les indicateurs de performance suivants :

- ✓ Disponibilité ;
- ✓ Taux d'utilisation ;
- ✓ Taux d'occupation.

- **TA : Tools Agent ou Agent Outils** ; Contient les outils nécessaires pour effectuer une tâche de maintenance.

L'agent Tools permet de déterminer le :

- ✓ Taux d'utilisation des ressources techniques ;
- ✓ Taux d'occupation par ressource Technique.

- **AEv : Agent Evaluateur** ; Lorsque l'opérateur est en interaction avec la machine dans la zone de maintenance, l'agent Evaluateur intervient pour détecter la situation

dangereuse, l'événement déclencheur, les dangers, les dommages pouvant survenir et les enregistre dans la Base de Données (BDD).

Après l'identification des risques, l'agent Evaluateur classifie ces risques selon quatre types de facteurs (Humains, Techniques, Organisationnel, Environnement). Ensuite, il les quantifie en déterminant leur gravité, leur fréquence et leur détectabilité et il les enregistre dans la Base de Données.

L'agent Evaluateur consulte la BDD et priorise selon un seuil de criticité (déterminer selon chaque entreprise), puis il propose des mesures de prévention adéquates à prendre en compte et il vérifie leurs cohérences, efficacités et harmonisations ensuite les enregistre dans la BDD que serviront par la suite comme historique.

Le fonctionnement interne de ces agents est présenté dans la figure V.6:

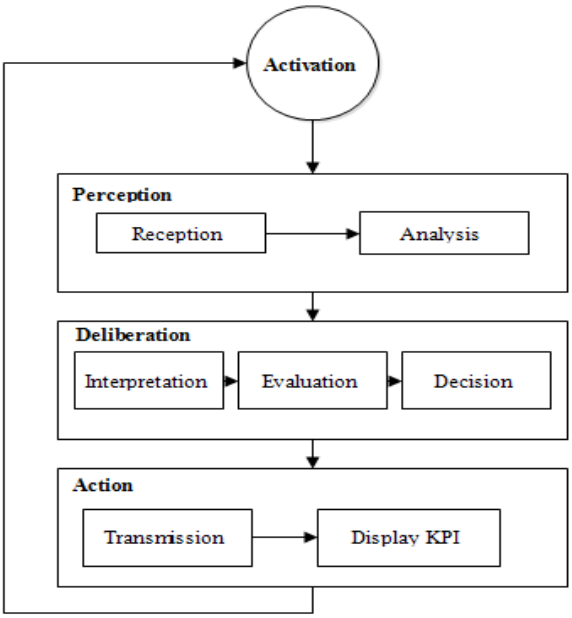


Figure V. 6. Cycle de fonctionnement de base d'un agent (Gallab *et al.*, 2015a).

Un agent, lors d'une simulation, se caractérise par sa dynamique et ses changements d'état de façon permanente. Son comportement lui permet d'évoluer dans le système. Ce comportement est caractérisé par des règles établies pour décrire la situation d'agent.

Le fonctionnement et le comportement des agents définis sont débutés par l'activation et l'entrée en activité. Suivi par la perception qui correspond à la réception et l'analyse des messages puis produit une réponse (action) et le transmet aux autres agents susceptibles d'être intéressés par le message et affiche les résultats (KPI). La réponse est obtenue dans l'étape de délibération qui se caractérise par l'interprétation des messages, l'évaluation et la prise de décision.

Pour formaliser la coordination dans le comportement des différents agents, nous avons adopté le diagramme d'activité UML (Fig. V.7). Ce diagramme représente les séquences d'opérations macroscopique et microscopique que décrit le comportement interne (algorithme) de chaque agent.

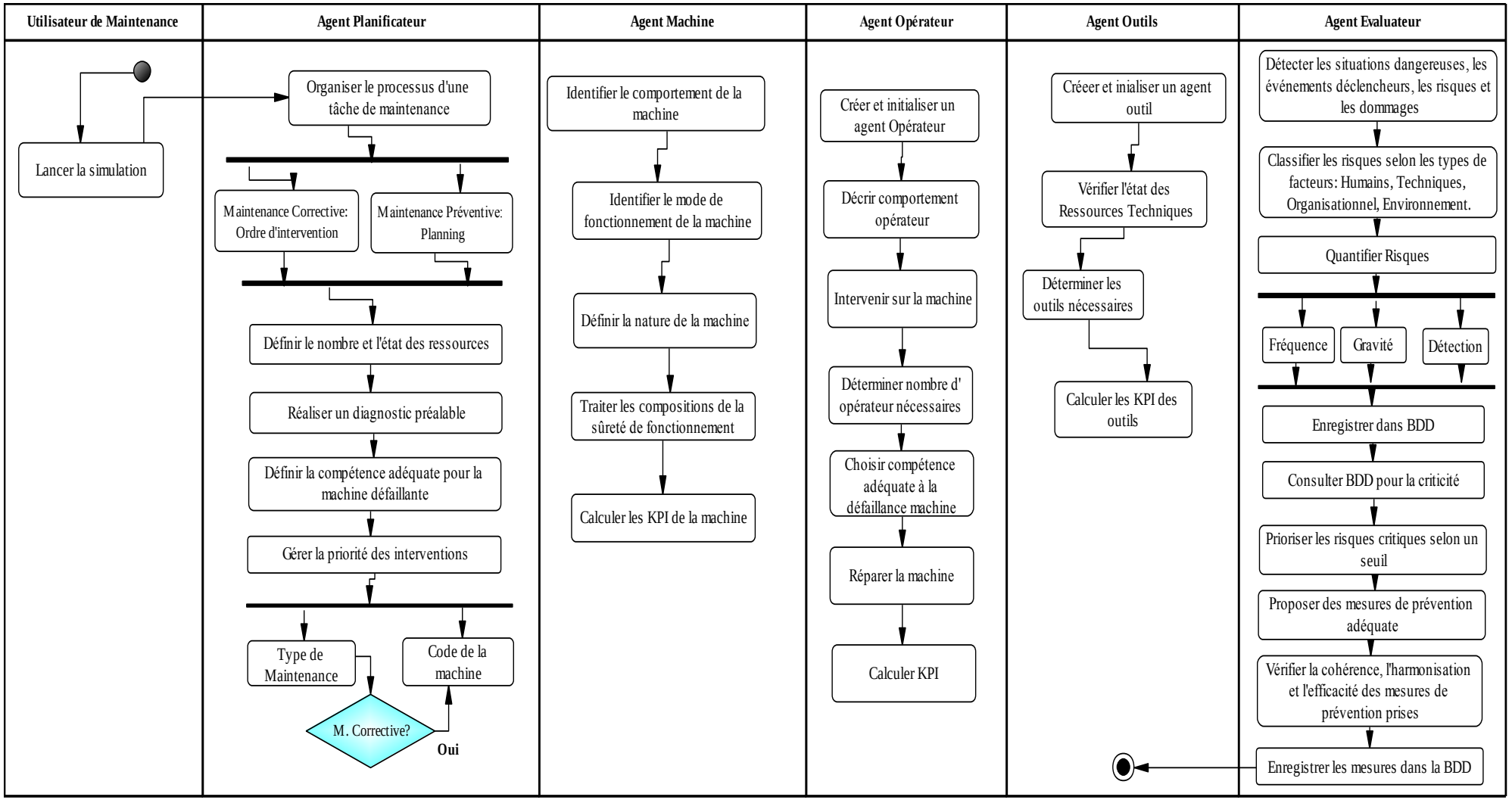


Figure V. 7. Diagramme d'activité des agents.

6.3.2. Les interactions

L'interaction est la mise en relation dynamique de deux ou de plusieurs agents par le biais d'un ensemble d'actions réciproques. On parle d'interaction lorsque la dynamique propre d'un agent est perturbée par les influences des autres.

Les interactions existant entre les différents agents présentés précédemment sont modélisées sous forme d'un diagramme de séquence d'UML (Fig. V.8).

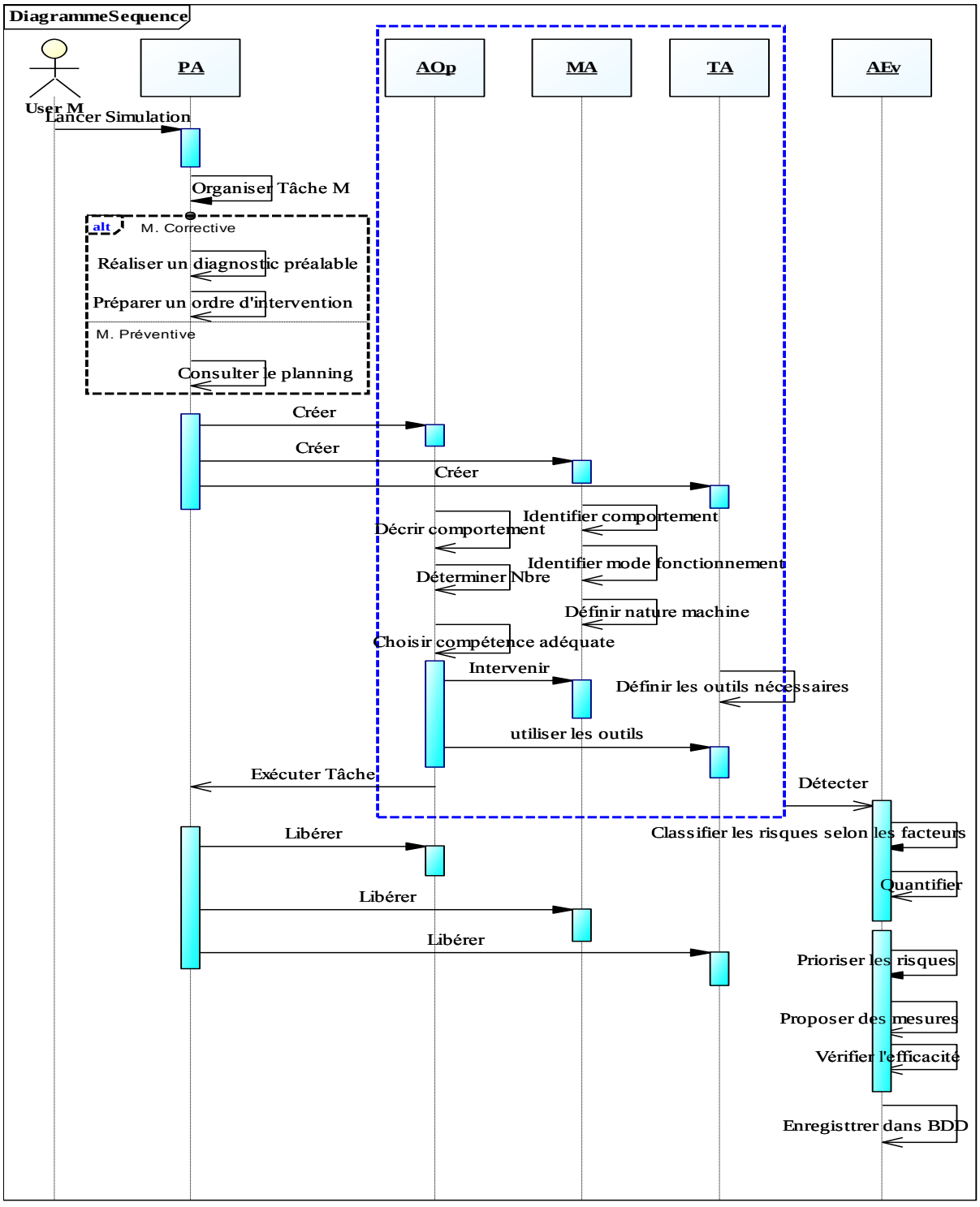


Figure V. 8. Diagramme de séquence des agents.

Ce diagramme décrit le déroulement d'une interaction entre les agents dans le cadre de la réalisation d'un scénario en mettant en évidence la dimension temporelle de cette interaction. Son intérêt est de mieux comprendre le fonctionnement du système et de modéliser la vie des agents dans le temps en précisant la chronologie des échanges de messages. La figure V.8 montre les interactions et les messages entre les agents que composent le système. Lorsque l'utilisateur lance la simulation, l'agent planificateur (PA) organise les tâches de maintenance et crée l'agent Machine (MA), l'agent Opérateur (AOp), et l'agent Tâche (TA). Une fois que ces agents réalisent leurs activités (Fig. V.7), l'agent Planificateur (PA) les libèrent.

Lorsque l'agent planificateur (PA) a en même temps deux tâches de maintenance : une corrective et une préventive, il donnera la priorité à la tâche corrective. Si les opérateurs ne sont pas disponibles et réalisent des tâches de prévention, l'opérateur arrête la tâche en cours et réalisera la tâche prioritaire qui est la tâche corrective comme représenté dans la Fig. V.9.

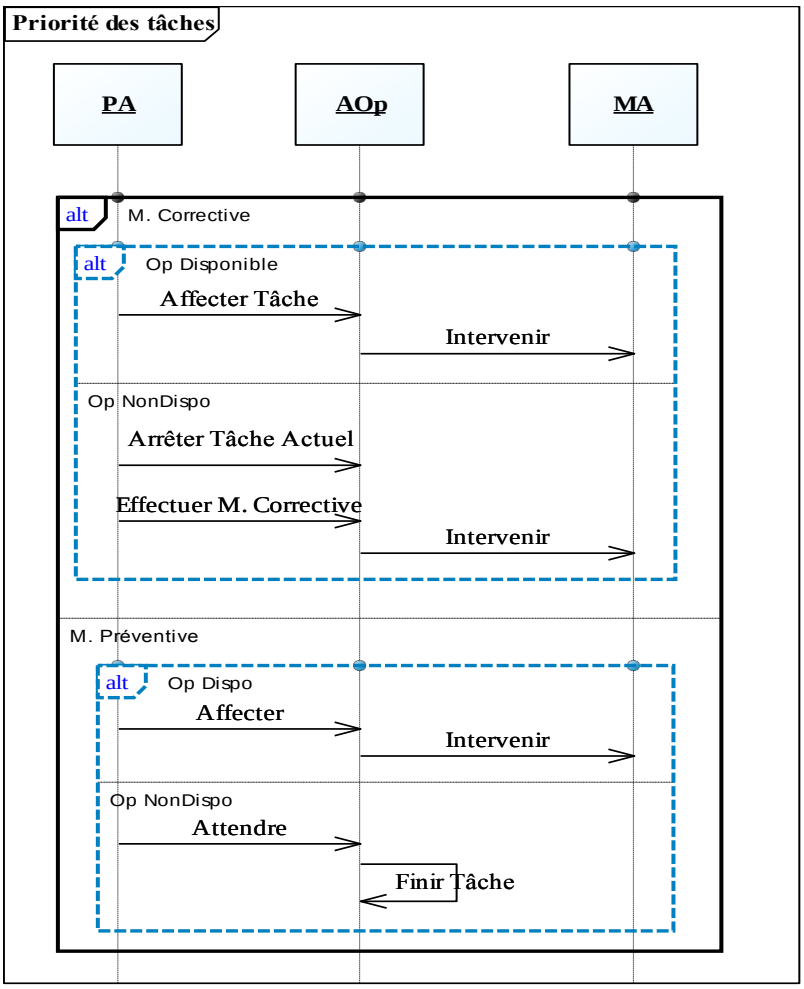


Figure V. 9. Diagramme de séquence de la priorité des tâches.

Si les deux tâches sont correctives, dans ce cas, l'agent planificateur (PA) donne la priorité à la machine la plus critique et significative de la production. Cette machine est identifiée par un code (Fig. V.10).

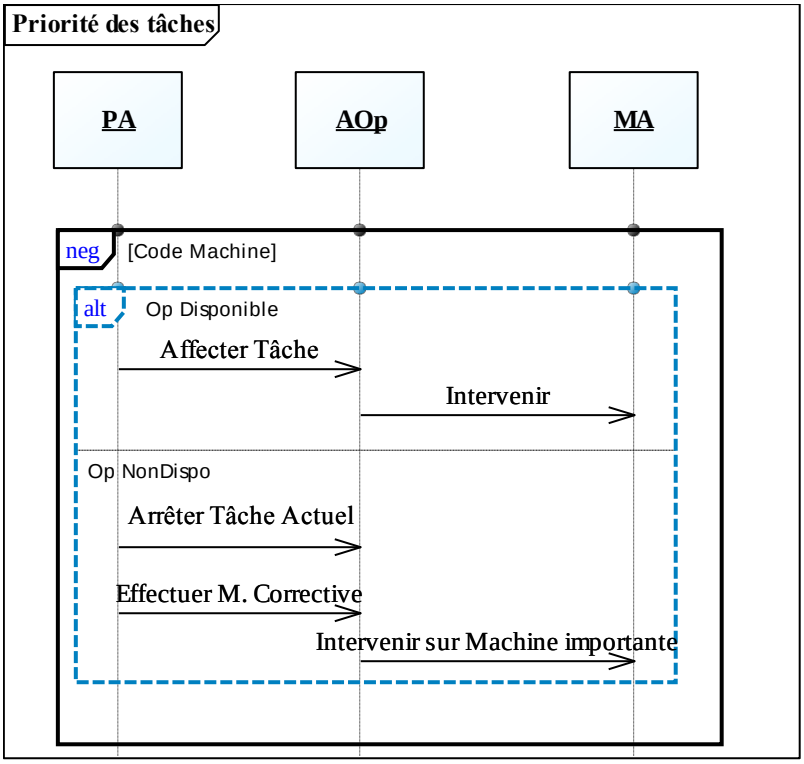


Figure V. 10. Diagramme de séquence de priorité des tâches par code machine.

6.3.3. L'organisation

Les organisations d'un SMA sont l'ensemble des rôles attribués aux agents pour qu'ils puissent atteindre, par coopération ou par compétition, un objectif global.

L'organisation des agents consiste en la modélisation des relations qui existent entre ces agents. Les agents doivent avoir une représentation de ces relations pour communiquer. Pour cela, nous avons besoin de modéliser les mécanismes qui permettront de supporter l'organisation ce groupe d'agents.

L'organisation du système multi-agent peut être structurée comme deux structures : structure organisationnelle de gestion de la maintenance, et structure organisationnelle de l'évaluation des risques.

- **Structure organisationnelle de la gestion de la maintenance**

Cette structure consiste d'un acteur (Utilisateur de maintenance) et de quatre agents : Agent Planificateur (PA), Agent Machine (MA), Agent Opérateur (AOp) et Agent Outils (TA).

L'agent planificateur est un agent de coordination entre l'utilisateur de maintenance (MU) et les trois agents. Il est subordonné par l'utilisateur de maintenance et communique directement avec lui. En outre, l'agent Planificateur (PA) crée et subordonne les trois agents : Agent machine (MA), Agent opérateur (AOp), et l'outil Agent (TA). Ces trois agents communiquent les uns avec les autres (Figure V.11, tableau V.3) :

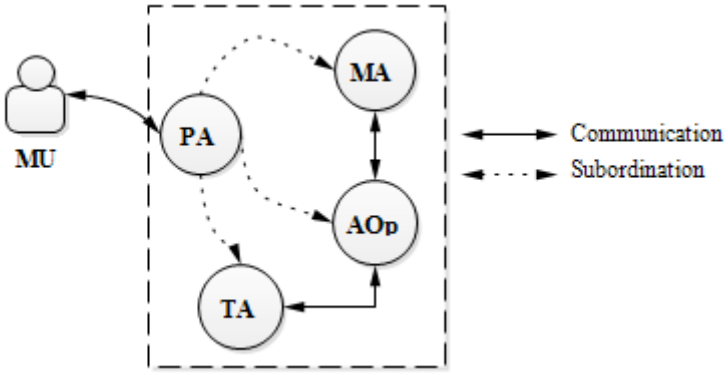


Figure V. 11. Structure Organisationnelle de la gestion de la maintenance.

TABLEAU V. 3. RELATIONS ENTRE LES AGENTS DE LA STRUCTURE ORGANISATIONNELLE POUR LA GESTION DE LA MAINTENANCE.

	MU	PA	MA	AOp	TA
MU		C,S			
PA	C,S		S	S	S
MA		S		C	C
AOp		S	C		C
TA		S	C	C	

C : Communication ; S : Subordination

- **Structure organisationnelle de l'évaluation des risques**

Elle est composée de quatre agents : Agent Evaluateur (AEv), Agent Machine (MA), Agent Opérateur (AOp) et Agent Outils (TA). L'agent machine, l'agent opérateur et l'agent outils communiquent entre eux dans leur environnement et forment un sous-système. L'agent évaluateur communique avec ce nouveau sous-système constitué de ces trois agents (Fig. V. 12, Tableau V.4).

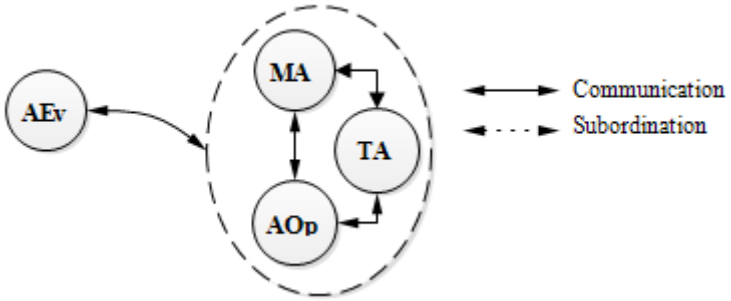


Figure V. 12. Structure organisationnelle de l'évaluation des risques.

TABLEAU V. 4. RELATIONS ENTRE LES AGENTS DE LA STRUCTURE ORGANISATIONNELLE POUR L'ÉVALUATION DES RISQUES.

	AEv	MA	AOp	TA
AEv		C		
MA	C		C	C
AOp		C		C
TA		C	C	

- **Structure générale du SMA**

Les deux structures organisationnelles définies précédemment ne sont pas indépendantes car il existe des relations communicationnelles entre elles.

Le tableau suivant résume les relations possibles entre les différents agents que constitue le système (Tableau V.5):

TABLEAU V. 5. RELATIONS ENTRE LES AGENTS DE LA STRUCTURE ORGANISATIONNELLE GÉNÉRALE.

	MU	**PA**	**MA**	**AOp**	**TA**	**AEv**
MU		C,S				
PA	C,S		S	S	S	
MA		S		C	C	C
AOp		S	C		C	
TA		S	C	C		
AEv			C			

6.3.4. L'environnement

L'environnement définit l'espace, le milieu, le réseau et la communication que les agents utilisent (Grigoriev, 2015). Dans notre cas, l'environnement est la zone de maintenance où les opérateurs interviennent sur une ou un ensemble de machine avec les moyens techniques et organisationnels.

Le modèle Multi-agents proposé est un modèle conceptuel qui pourra être utilisé par n'importe quel domaine d'activité des entreprises qui cherchent à maîtriser les risques dans les activités de maintenance. Ce modèle permet également de connaître le nombre de ressources (opérateurs, outils) nécessaires pour la réalisation d'une tâche tout en garantissant une meilleure disponibilité des machines.

7. CONCLUSION

Ce chapitre a présenté un aperçu sur les concepts de simulation et le paradigme multi-agents. Nous avons présenté également les méthodes de conception des SMA, et nous avons fait une comparaison entre les plateformes les plus connues et utilisées afin de choisir la plateforme adéquate pour notre travail. A la fin, nous avons proposé une architecture conceptuelle du modèle multi-agents pour la maîtrise des risques dans les activités de maintenance. L'implémentation du modèle proposé serait sur la plateforme AnyLogic.

Le chapitre suivant est dédié à l'application et la simulation du modèle proposé sur la chaîne logistique du site Relais Vrac de l'entreprise PRIMAGAZ France.

BIBLIOGRAPHIE

Acronymics Inc., 2004. AGENTBUILDER: An Integrated Toolkit for Constructing Intelligent. Software Agents. Reference Manual. http://www.agentbuilder.com.
Archived at http://www.webcitation.org/6QWerbbZQ.

Aissani, N., Beldjilali, B., Trentesaux, D., 2009. Dynamic scheduling of maintenance tasks in the petroleum industry: A reinforcement approach. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 22, pp. 1089-1103.

Aissani, N., Guetarni, I.H.M., 2015. From Centralized Modelling to Distributed Design in Risk Assessment and Industrial Safety: Survey and Proposition. Service Orientation in Holonic and Multi-Agent Manufacturing. Springer International Publishing Switzerland 2015, Studies in Computational Intelligence 594, pp.125-134.

Almeder, C., Preusser, M., 2007. A hybrid Simulation Optimization approach for supply chains. Proceeding EUROSIM/ SLOSIM, 09-13 September 2007, Ljubljana, Slovenia. pp. 1-6.

Austin, J.L., 1962. How to do Things with words. Clarendon Press.

Bakhta, N., 2013. Multi-agent model for designing a support system of collective decision. Thesis in Computer Science. University of Oran.

Banks, J., Ed., 1998. Handbook of Simulation: Principles, Methodology, Advances, Applications, and Practice. John Wiley & Sons, New York, NY.

Banks, J., Carson, J.S., Nelson, B.L., Nicol, D.M., 2005. Discrete-Event System Simulation. Fourth Edition, Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ.

Barahona, F., Ettl, M., Petrik, M., Rimshnick, P., 2013. Agile logistics simulation and optimization for managing disaster responses. Proceedings of the 2013 Winter Simulation Conference, 978-1-4799-2076-1/13/$31.00 ©2013 IEEE, pp. 3340-3351.

Bazan, P., German, R., 2012. Hybrid simulation of renewable energy generation and storage grids. Proceedings of the 2012 Winter Simulation Conference, 978-1-4673-4781-5/12/$31.00 ©2012 IEEE.

Behdani, B., Lukszo, Z., Adhitya, A., Srinivasan, R., 2010. Performance Analysis of a Multi-plant specialty chemical manufacturing enterprise using an agent-based model. Computers and Chemical Engineering, vol 34, Issue 5, pp. 793-801.

Bellifemine, F., Caire, G., Poggi, A., Rimassa, G., 2003. JADE: A white Paper. EXP in search of innovation, 3(3), 6-19.

Ben Kahla, I., 2011. Gestion des risques et aide à la décision dans la chaîne logistique hospitalière: Cas des blocs opératoires du CHU Sahloul. Laboratoire LAGIS, FRE CNRS 3303 à l'Ecole Centrale de Lille et l'Unité de Recherche TRANSALOG, Tunis.

Borshchev, A. V., Karpov, Yu. G., Kharitonov, V. A., 2002. Distributed simulation of hybrid systems with AnyLogic and HLA. Future Generation Computer Systems. 18(6): 829-839.

Borshchev, A., 2013. The Big Book of Simulation Modeling: Multimethod Modeling with Anylogic 6. AnyLogic North America. ISBN: 978-0-9895731-7-7.

Bouzidi-Hassini, S., Benbouzid-Si Tayeb, F., Marimier, F., Rabahi, M., 2015. Considering human resource constraints for real joint production and maintenance schedules. Computers & Industrial Engineering, Vol 90, pp. 197-211.

Bratman, M.E., 1987. Intention, Plans, and Practical Reason, Harvard University Press.

Brazier, F.M.T., Dinnin-Kepliczb, M., Jennings, N.R., Treur, J., 1997. DESIRE: Modelling Multi-Agent Systems, in a Compositional Framework. International Journal of Cooperative Informations Systems, 6(1): 64-94.

Briot, J.P., Demazeau, Y., 2001. Introduction aux agents, Principes et architecture des systèmes Multi-Agents. Collection IC2, Hermès.

Chaib-draa, B., Moulin, B., Mandiau, R., Millot, P., 1992. Trends in distributed Artificial Intelligence. Artificial Intelligence Review 6, 35-66.

Chaib-draa, B., Jarras, I., Moulin, B., 2001. Systèmes multi-agents : principes généraux et applications. Editions J.P. Biot, Demazeau, Agent et systèmes multi-agents, Hermès, 2001.

Chaib-draa, B., Jarras, I., 2002. Aperçu sur les systèmes multi-agents, Scientific Series. Montréal Juillet 2002.

Collinot, A., Drogoul, A., 1998. La méthode de conception multi-agent CASSIOPEE : Application à la robotique collective. Revue d'intelligence artificielle, 12(1): 125-147.

Demazeau, Y., 1995. From interactions to collective behaviour in agent-based systems", 1995.

Demazeau, Y., 2001. Voyelles. Enabling memory to direct research, INP Grenoble, 2001.

Djanatliev, A., German, R., 2015. Towards a guide to domain-specific hybrid simulation. Proceedings of the 2015 Winter Conference, 978-1-4673-9743-8/15/$31.00 IEEE, pp. 1609-1620.

Drogoul, A., 1993. De la simulation multi-agent à la résolution collective de problèmes. Université Paris VI, 1993.

Erceau, J., Ferber, J., 1991. L'intelligence artificielle distribuée. Recherche 233 Juin 1991, Volume 22.

Erman, L.D., Hayes-Roth, F., Lesser V.R, Reddy, D.R., 1980. The Hearsay II speech understanding system; Integrating knowledge to resolve uncertainty, ACM Computing Survey, vol. 12, pp. 213-253.

Felberbauer, T., Altendorfer, K., 2014. Comparing the performance of two different customer order behavior within the hierarchical production planning. Proceedings of the 2014 Winter Simulation Conference, 978-1-4799-7486-3/14/$31.00 ©2014 IEEE, pp. 2227-2238.

Ferber J., 1995, Les systèmes multi-agents : Vers une intelligence collective. InterEditions, Paris.

Frayert, J.M., D'amours, S., Rousseau, A., Harvey, S., Gaudreault, J., 2008. Agent-based supply chain planning in the forest products industry. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 25, n° 7-8, pp. 811-819.

Fung, R.Y.K., Chen, T., 2005. Multi-Agent Supply Chain planning and coordination architecture. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 25, n° 7-8, pp. 811-819.

Gallab, M., Bouloiz, H., Tkiouat, M., 2015a. Decision Support for Occupational Risk Overcome in Maintenance Activities. Science and Information Conference (SAI), pp.426-434, London-UK, 28-30 Juillet 2015. doi: 10.1109/SAI.2015.7237177. ISBN: 978-1-4799-8546-3.

Gallab, M., Bouloiz, H., Garbolino, E., Tkiouat, M., 2015b. Model for developing a database for risk analysis. Industrial Engineering and Systems Management (IESM), 2015 International Conference on, Seville, 2015, pp. 833-841. doi: 10.1109/IESM.2015.7380253.

Gallab, M., Bouloiz, H., Tkiouat, M., Garbolino, E., ElKilni, M.A., 2016a. Simulation of Failure Scenarios related to Maintenance Activities. International Journal of Applied Engineering Research, Vol: 11, N°24, 2016, pp. 11935-11949.

Gallab, M., Bouloiz, H., Chater, Y., Tkiouat, M., 2016b. Towards a Simulation Model to Ensure the Availability of Machines in Maintenance Activities. International Journal of Computer, Electrical, Control and Information Engineering, Vol. 10, N°7, 2016, pp. 1213- 1217.

Giannakis, M., Louis, M., 2011. A Multi-Agent based framework for supply chain risk management. Journal of Purchasing & Supply Management 17, 23–31.

Gleizes, M-P., Bernon, C., Migeaon, F., Gauthier, P., 2009. Development of methods of multi-agent systems. Software engineering, no 86 (2009): pp - 66.

Gordan, J., Kusek, M., Lovrek, I., Howlett, R., C. Jain, L., 2014. Agent and Multi-Agent Systems: Technologies and Applications. Proceedings of the 8th International Conference KES-AMSTA 2014. Chania, Greece, June 2014. Advances in Intelligent Systems and Computing, Vol.296.

Grignard, A., Taillandier, P., Gaudou, B., An Vo, D., Huynh, N., Drogoul, A., 2013. GAMA 1.6: Advancing the Art of Complex Agent-Based Modeling and Simulation. The 16th International Conference on Principles and Practices in Multi-Agent Systems (PRIMA), 8291, 242 – 258

Grigoryev, I., 2015. Anylogic 7 in three days: A quick course in simulation modeling. ISBN-13: 978-1508933748.

Groner, M.L., Cox, R., Gettinby, G., Revie, C.W., 2013. Use of agent-based modeling to predict benefits of cleaner fish in controlling sea lice, lepeophtheirus salmonis, infestations on farmed atlantic salmon, salmo salar L. Journal of Fish Diseases 2013, 36, 195-208

Guo, Q., Zhang, M., 2009. A novel approach for multi-agent-based Intelligent Manufacturing System. Information Sciences, vol 179, Issue 18, pp. 3079-3090.

Gutknecht, O., Ferber, J., 2000. Madkit: a Generic Multi-Agent Platform. Autonomous Agents. AGENTS 2000, Barcelona, ACM Press, 78 – 79, doi:10.1145/336595.337048.

Hassaine, L., 2009. Conception et réalisation d'un système de négociation automatique appliqué aux ventes en enchère.

Helbing, D., Balietti, S., 2012. How to do Agent-Based Simulations in the Future: From Modeling Social Mechanisms to Emergent Phenomena and Interactive Systems Design. Doi 10.1007/978-3-642-24004-1 2, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012.

Hewitt, C., 1977. Viewing Control Structures as Patterns of Message Passing. Artificial Intelligence, vol 8, N° 3, pp: 323-364.

Huget, M.P., 2005. Agent Communication. In Intelligent Decision support systems in Agent-Mediated Environments, vol. 115, frontiers in Artificial Intelligence and Applications. Gloria Phillips-wren and Lakhmi Jain (eds), IOS Press.

Iglesias, C.A., Garijo, M., Gonzalez, J.C., Velasco, J.R., 1998. Analysis and design of multi-agent systems using MAS-CommonKADS.

Jarras, I., Chaib-draa, B., 2002. Apperçu sur les systèmes multi-agents. Série scientifique. Centre Interuniversitaire de recherche en analyse des organisations. Montréal, Canada, Juillet 2002.

Jianxi, F., Yuanlue, F., 2012. Case-based Reasonind and Multi-Agents for Cost Collaborative Management in Supply Chain. Procedia Engineering, volume: 29, pp. 1088-1098.

Jinks, S., Scalan, J., Reed, P., Wiseall, S., 2010. Utilizing Dynamic Simulation to improve unit cost estimation and aid design decisions. Proceedings of the 2010 Winter Simulation Conference. p. 1758-1766.

Kaegi, M., Mock, R., Kroger, W., 2009. Analyzing maintenance strategies by agent-based simulations: A feasibility study. Reliability Engineering and System Safety, Vol 94, Issue 9, pp. 1416-1421.

Kamoun, M.A., 2007. Conception d'un système d'information pour l'aide au déplacement multimodal: Une approche multi-agent pour la recherche et la composition des itinéraires en ligne. Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lille et l'Université des Sciences et Technologies de Lille (LAGIS) / ESTAS de l'INRETS, France, 2007.

Kaplanoglu, V., 2014. Multi-agent based approach for single machine scheduling with sequence-dependent setup times and machine maintenance. Applied Soft Computing, Vol 23, pp. 165-179.

Karuna, H., Valckenaers, P., Saint-Germain, B., Verstraete, P., Zamfirescu, C.B., Van Brussel, H., 2005. Emergent Forecasting Using a Stigmergy Approach in Manufacturing Coordination and Control. Engineering Self-organising Systems: Methodologies and Applications, pp. 34-64.

Kim, S., Mungle, S., Son, Y.J., 2013. An agent-based simulation approach for dual toll pricing of hazardous material transportation. Proceedings of the 2013 Winter Simulation Conference. 978-1-4799-2076-1/13/$31.00 ©2013 IEEE, pp. 2520-2531.

Kinny, D., Georgeff, M., Rao, A., 1996. A Methodology and Modelling Technique for Systems of BDI agents. W.Van de VELDE et J.W. PERRAM, éditeurs : Agents Breaking Away : Proceeding of the Seventh European Workshop on Modelling Autonomous Agents in a Multi-Agent World, vol. 1038 de Lecture Notes in Artificial Intelligence (LNAI), pages 51-71. Springer-Verlag.

Kizim, A.V., 2013. Establishing the maintenance and repair body of knowledge: Comprehensive approach to ensuring equipment maintenance and repair organization efficiency. Original Research Article Procedia Technology, Volume 9, 2013, pp. 812-818.

Khelifati, S., Benbouzid-Sitayeb, F., 2011. A multi-agent approach for scheduling jobs and maintenance operations in the flowshop sequencing problem. International Journal of Intelligent Engineering Informatics, 2(1), 47–70.

Kruger, G.H., Shih, A., Hattingh, D., Niekerk, T.I.V., 2011. Intelligent machine agent architecture for adaptive control optimization of manufacturing processes. Advanced Engineering Informatics, vol 25, Issue 4, pp. 783-796.

Labarthe, O., 2006. Modélisation et simulation orientées agents de chaînes logistiques dans un contexte de personnalisation de masse: modèles et cadre méthodologique, Thèse de Doctorat en cotutelle, Faculté des études supérieurs de l'Université Laval, Québec et Faculté des sciences et techniques de l'Université Paul Cézanne, Marseille, 2006.

Labarthe, O., 2007. Modelling and simulation oriented supply chain officers in a mass customization context models and methodological framework, PhD thesis under joint supervision, Faculty of Graduate Studies at Laval University, Quebec, and Faculty of Science and Technology of the University Paul Cézanne, Marseille, 2006.

Lachtar D., Garbolino E., 2012. Performance Assessment of Crisis Management Plans with the Contribution of multi-agent Systems. AIDIC, Chemical Engineering Transactions, Vol 26, pp. 447-270.

Law, A.M., Kelton, W.D., 2000. Simulation Modeling and Analysis, 3rd Ed., New York: McGraw-Hill.

Le Page, C., Bousquet, F., 2007. The Cormas platform: Tutorial. ESSA 2007: 4th Conference for European Association of social Simulation. Toulouse, France.

Lesser, V.R., Corkill, D.G., 1983. The distributed vehicle Monitoring Testbed: A tool for investigating distributed problem solving networks, Al Magazine, vol. 4, N° 3, pp. 15-33.

Luke, S., Cioffi-Revilla, C., Panait, L., Sullivan, K., Balan, G., 2005. MASON: A Multi-Agent Simulation Environment. In Simulation: Transactions of the society for Modeling and Simulation International, 82(7), 517 – 527. [doi:10.1177/0037549705058073].

Lynch, C., Padilla, J., Diallo, S., Banks, C., 2014. A multi-paradigm modeling framework for modeling and simulating problem situations. Proceedings of the 2014 Simulation Conference, 978-1-4799-7486-3/14/$31.00 ©2014 IEEE, pp. 1688-1699.

Magarino, I.G., Gutiérrez, C., 2013. Agent-oriented modelling and development of a system for crisis management. Expert Systems with Applications, vol 40, Issue 16, pp. 6580-6592.

Marmier, F., Varnier, C., Zerhouni, N., 2009. Proactive, dynamic and multi-criteria scheduling of maintenance activities. International Journal of Production Research, 47(8), 2185–2220.

Mazhari, E.M., Zhao, J., Celik, N., Lee, S., Son, Y.J., Head, L., 2009. Hybrid simulation and optimization based capacity planner for integrated photovoltaic generation with storage units. Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference, 978-1-4244-5771-7/09/$26.00 ©2009 IEEE, 1511-1522.

Mazyad, H., 2013. An Approach to Multi-Agent Architecture for P2P Collaborative Learning (thesis). University of Litoral côte d'opale. Laboratoire informatique et image de signale de la côte d'opale.

Monostori, T., Vancza, J., Kumara, S.R.T., 2006. Agent-based systems for manufacturing. Annals of the CIRP, vol. 55, n°2, pp. 697-720.

Naciri, N., Tkiouat, M., 2015a. Agent Based Platforms: Review and Comparison. International Journal of Applied Engineering Research (IJAER), Vol. 10, N°14, pp. 34224-34229, 2015.

Nguyen, C.K.Q., Dietz, J.E., Liles, S., Raskin, V., Springer, J., 2015. Cyber Defense Econometric of a power grid distribution infrastructure. Proceedings of the 2015 Winter Simulation Conference, 978-1-4673-9743-8/15/$31.00 ©2015 IEEE, 906-907.

Nwana, H., Lee, L., Jennings, N., 1996. Coordination in software agent systems, BT Laboratories internal report.

Osgood, N., Liu, J., 2014. Towards closed loop modeling: Evaluating the prospects for recurrently reground aggregate simulation models using particle filtering. Proceedings of the 2014 Winter Simulation Conference, 978-1-4799-7486-3/14/$31.00 ©2014 IEEE, pp. 829-841.

Panteleev, V.V., Kamaev, V.A., Kizim, A.V., 2014. Developing a Model of Equipment Maintenance and Repair Process at Service Repair Company Using Agent-Based Approach. Procedia Technology, Vol 16, pp. 1072-1079.

Picard, G., Gleizes, MP., 2004. The ADELFE Methodology- Designing adaptive Cooperative Multi-Agent Systems, volume methodologies and Software Engineering for Agent Systems. Chapter 8, pages 157-176. Kluwer.

Rezki, N., Mouss Layla, H., Kazar, O., 2013. Design of multi-agent system for quality control and machine maintenance". Control, Decision and Information Technologies (CoDIT), International Conference on, Hammamet, pp. 794-797.

Russel, S.J., Norving, P., 2003. Artificial Intelligence. A modern Approach. Prentice Hall, 2003.

Sabar, M., 2008. An approach based agent for the planning and scheduling in real time staff in a flexible assembly line context. Laval University, Faculty of Business Administration, Quebec, Canada.

Sacile, R., Poalucci, M., 2004. Agent-Based Manufacturing and Control Systems: New Manufacturing Solutions for Achieving Peak Performance. ISBN 1574443364, p. 288.

Secchi, D., Neumann, M., 2016. Agent-Based Simulation of Organizational Behavior: New Frontiers of Social Science Research. Springer International Publishing Switzerland, 2016. DOI 10.1007/978-3-319-18153-0_1.

Searle, J.R., 1969. Speech acts: An essay in the Philosophy of Language. Cambridge University Press.

Shen, W., Hao, Q., Yoon, H.J, Norrie, D.H., 2006. Applications of agent-based systems in intelligent manufacturing: an updated review. Advanced Engineering Informatics, vol.20, pp. 415-431.

Smith, R.G., 1980. The contract net protocol: high-level communication and control in distributed problem solver. IEEE Transactions on Computers, vol. 29, N°12, pp. 1104-1113.

Swarmfest, 2012. SDG's annual agent-based modeling conference.

http://www.swarm.org/index.php/Swarmfest_2012. Archived at http://www.webcitation.org/6QWgWxpcI.

Tisue, S., Wilensky, U., (2004, updated 2013). NetLogo: Design and implementation of a multi-agent modeling environment. In Proceedings of the Agent 2004 Conference on Social Dynamics: Interaction, Reflexivity and Emergence, Chicago, Illinois.

Tounsi, J., 2012. A multi-agent knowledge model for SMEs mechatronic supply chains. Journal of Intelligent Manufacturing 23, 2647-2665 (2012) pp. 2647-2665.

Weiss, G., 1999. Multi-agent Systems: A Modern Approach to Distributed Modern Approach to Artificial Intelligence. Massachusetts Institute of Technology, 1999.

Wilensky, U., Rand, W., 2015. An introduction to Agent-Based Modeling: Modeling Natural, Social, and Engineered Complex Systems with NetLogo. The Massachusetts Institute of Technology Press. Cambridge, Massachusetts. London, England.

Wooldridge, M., Jennings, N.R., 1995. Intelligent Agents: Theory and Practice. The knowledge Engineering Review, 10(2), pp. 115-152, 1992.

Wooldridge, M., Jennings, N.R., Sycara. B. 1998. A roadmap of agent research and development. Int Journal of Autonomous Agents and Multi-Agent Systems, 1(1):7-38,1998.

Wooldridge, M., Deloach, S.A., 2000. An overview of the multi-agent systems engineering methodology, Agent Software Engineering. Proceedings of the first International Workshop on Agent-Oriented Software Engineering. Lemerick, Irlande, Springer, Verlag, Juin 2000.

Wooldridge, M., 2002. An introduction to Multi-Agent systems. Wiley Ed, 2002.

Yeung, W.L., 2011. Behavioral modelling and verification of multi-agent systems for manufacturing control. Expert Systems with applications, vol 38, pp.13555-13562.

Yuan, J., Ponsignon, T., 2014. Towards a SemiConductor Supply Chain Library (SCSC-SIMLIB). Proceedings of the 2014 Winter simulation Conference. 978-1-4799-7486-3/14/$31.00©2014 IEEE, pp. 2522-2532.

Zeigler, B., Praehofer, H., Kim, T., 2000. Theory of modeling and simulation: Integrating discrete event and continuous complex dynamic systems. Academic Press.

Zgaya, H., 2007. Conception et optimisation distribuée d'un système d'information d'aide à la mobilité urbaine : une approche multi-agents pour la recherche et la composition des services liés au transport. Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lille, 2007.

Zhou, R., Fox, B., Lee, H.P., Nee, A.Y.C., 2004. Bus maintenance scheduling using multi-agent systems. Engineering Applications of Artificial Intelligence 17, 623–630.

CHAPITRE VI

APPLICATION ET DISCUSSION DU MODÈLE PROPOSÉ

INTRODUCTION 143

1. MODÉLISATION DU SYSTÈME POUR L'ANALYSE DES RISQUES DES ACTIVITÉS DE MAINTENANCE 143

1.1. Identification et modélisation du système 143

1.1.1. Le compresseur 144

1.1.2. La pompe 144

1.1.3. Le bras Gaz/ Liquide 145

1.1.4. Les détecteurs Gaz/Flamme 145

1.2. Identification des dangers et les principaux scénarios d'accidents 148

1.3. Quantification des risques 151

1.3.1. Gravité 151

1.3.2. Probabilité 151

1.3.3. Détectabilité 152

1.4. Mesures de sécurité 153

2. SIMULATION DU COMPORTEMENT DU SYSTÈME ETUDIÉ 156

2.1. Simulation du système en fonctionnement normal 157

2.1.1. Vérification Camion 157

2.1.2. Opérations de chargement 158

2.1.3. Opérations de déchargement 159

2.2. Simulation des scénarios de défaillance 161

2.3. Simulation des Indicateurs de Performance de Maintenance (KPIs) 165

3. DISCUSSION DES RÉSULTATS 167

3.1. L'apport du modèle MOSAR-UML 170

3.2. L'apport de la simulation multi-agents sur la plateforme AnyLogic 173

4. CONCLUSION 176

BIBLIOGRAPHIE 176

INTRODUCTION

Le secteur de GPL est considéré parmi les secteurs les plus accidentologies vue les accidents majeurs qui l'ont marqué. Plus loin, les activités de maintenance sont des sources des dangers et les conditions de travail complexe impliquent plusieurs interactions entre les opérateurs, les équipements et l'environnement du travail.

Notre étude traite les risques dans les activités de maintenance au sein de la chaîne logistique de GPL, afin de réduire les défaillances de maintenance. L'objectif est de modéliser le système à étudier, de déterminer les opérations de maintenance ainsi que les défaillances pouvant surgir, de les simuler pour voir leurs influences sur les équipements et sur la chaîne de chargement / déchargement des GPL.

Dans ce chapitre, nous appliquons la méthodologie proposée qui englobe à la fois l'analyse des risques, la modélisation et la simulation. Le modèle MOSAR-UML présenté précédement permet de modéliser et analyser les risques du système. Par la suite, un simulateur est développé à base du modèle multi-agent qui sera implémenté dans la plateforme AnyLogic.

1. MODÉLISATION DU SYSTÈME POUR L'ANALYSE DES RISQUES DES ACTIVITÉS DE MAINTENANCE

Pour modéliser et analyser les risques du site relais vrac, nous allons appliquer le modèle MOSAR-UML décrit précédemment qui vise à analyser les risques liés aux activités de maintenance et qui cherche à maintenir la sécurité du système de maintenance. Ce modèle présente et décrit les étapes de l'analyse des risques de la méthode MOSAR comme un diagramme de classes pour montrer de nouvelles interactions entre les différentes entités. Ces étapes sont les suivantes : identification et modélisation du système, identification des dangers et les scénarios d'accidents principaux, et quantification des risques.

Le modèle MOSAR-UML permet la persistance de l'information en traduisant les entités de diagramme des classes à des tables PostgreSQL (Système de Gestion de base de données SGBD). Les données figurant dans les 46 tables obtenues seront regroupés dans trois tableaux (Tableau VI.1, VI.3 et VI.7) réalisés par le langage SQL qui représentent les informations essentielles sur les étapes de modèle MOSAR-UML. Ces tableaux peuvent être modifiés et adaptés selon les besoins pour chaque cas en modifiant le code de programmation.

1.1. Identification et modélisation du système

Cette 1ère étape du modèle MOSAR-UML permet de définir et d'identifier le système étudié et détermine les éléments que constitue la situation du travail, tel qu'il est développé dans le tableau VI.1 (p.146).

Les équipements choisis pour la modélisation sont : Les compresseurs, les pompes, Bras liquide/ Gaz, et les détecteurs Gaz/Flamme. Le choix de ces équipements a été fait par le

responsable du site Relais Vrac de l'entreprise PRIMAGAZ France vue qu'ils présentent des risques lors des opérations de maintenance.

1.1.1. Le compresseur

Un compresseur est un organe destiné à augmenter la pression d'un gaz. Il est conçu pour comprimer des gaz sous forme de vapeur et en aucun cas sous forme de liquide. Or la grande majorité des gaz véhiculés ont tendance à se reliquéfier plus ou moins facilement en fonction des variations de température et de pression possibles (ex: diminution de la température au cours de la nuit). Pour cette raison, le compresseur est équipé par des dispositifs de sécurité tels que:

- Piège à liquide (ballon anti-envahissement): est un organe de sécurité indispensable destiné à protéger le compresseur contre un envahissement liquide en arrêtant le groupe et/ou en empêchant son redémarrage dans ces conditions.

- Pressostat à refoulement: contrôleur de pression pour les compresseurs.

- Soupape de sécurité : est un dispositif de protection contre les surpressions dans des ensembles soumis à pression.

Le fonctionnement du compresseur lors de déchargement des camions gros porteurs se fait en 2 phases:

- 1ère phase : la phase gaz du stockage fixe est aspirée, comprimée et injectée dans la phase gaz de la citerne à vidanger. La pression dans la citerne augmente alors et le liquide est chassé vers le stockage ;

- 2ème phase: lorsque toute la phase liquide a été transférée, la vanne liquide est fermée, le sens du transfert du compresseur est inversé au moyen d'une vanne 4 voies. Cette phase permet de dépressuriser la citerne en aspirant une partie de la phase gazeuse vers le stockage.

  A l'aspiration de chaque compresseur, se trouve un réservoir de condensation destiné à piéger le liquide éventuellement présent dans les lignes. La pression au refoulement des compresseurs est limitée par un pressostat, asservi au compresseur et à une soupape.

En effet, le compresseur dispose d'un piège à liquide à son aspiration et d'un pressostat à son refoulement qui déclenche l'arrêt du compresseur à un seuil de 12 bars. Le débit de compresseur est de $110m^3/h$.

1.1.2. La pompe

La pompe est un dispositif permettant d'aspirer et de refouler un fluide. Son débit est de $50m^3/h$. Elle constitue de :

- Joint: un point de raccordement de deux éléments.
- Bride: un organe mécanique de blocage utilisé pour assembler des organes hydrauliques tels que les vannes, les clapets, les robinets et des instruments de mesure.
- Garniture: un dispositif assurant l'étanchéité entre l'arbre de pompe et le corps de la pompe.
- Clapet anti-retour : un dispositif installé sur une tuyauterie qui permet de contrôler le sens de circulation d'un fluide quelconque. Le liquide, le gaz, l'air comprimé, qui peut passer dans un sens mais le flux est bloqué si celui-ci vient à s'inverser. Ce dispositif est constitué d'une soupape et d'un dispositif de recirculation. Ce dernier protège la pompe contre les surpressions et leur assure un débit minimum lorsque les clapets sont ouverts.

1.1.3. Le bras Gaz/ Liquide

Un bras Gaz/ liquide permet le transvasement d'un liquide ou d'un gaz liquéfié d'une citerne à une autre. Le chargement s'effectue par l'intermédiaire d'un bras liquide et le déchargement s'effectue par l'intermédiaire d'un bras liquide et d'un bras gazeux. Chaque bras est équipé par :

- Des vannes : une vanne est un dispositif destiné à contrôler le débit d'un fluide liquide ou gazeux.
- Un boitier de rupture « Flip-Flap » : un organe de sectionnement. Il constitue un point préférentiel de rupture d'un bras de transfert (chargement / déchargement) en cas de mouvement axial ou longitudinal accidentel de la citerne mobile et permet d'isoler les lignes amont et aval qu'il protège, et se rompt instantanément en cas d'arrachement du bras avec fermeture mécanique à chaque extrémité.

1.1.4. Les détecteurs Gaz/Flamme

Les détecteurs Gaz/Flamme détectent soit l'apparition de mélange d'air avec des gaz combustibles tels que le propane et le butane ou l'apparition d'un incendie potentiel.

Les détecteurs sont répartis sur l'ensemble du site et sont implantés au niveau des zones de stockage et de transfert de GPL, des postes de chargement / déchargement, des pompes et compresseurs… comme illustré dans la figure VI.1.

Un détecteur est constitué d'un capteur qui est l'élément sensible responsable de la transformation d'une information physique (pression, température, débit, concentration, radiation électromagnétique…) en grandeur électrique adaptée au traitement.

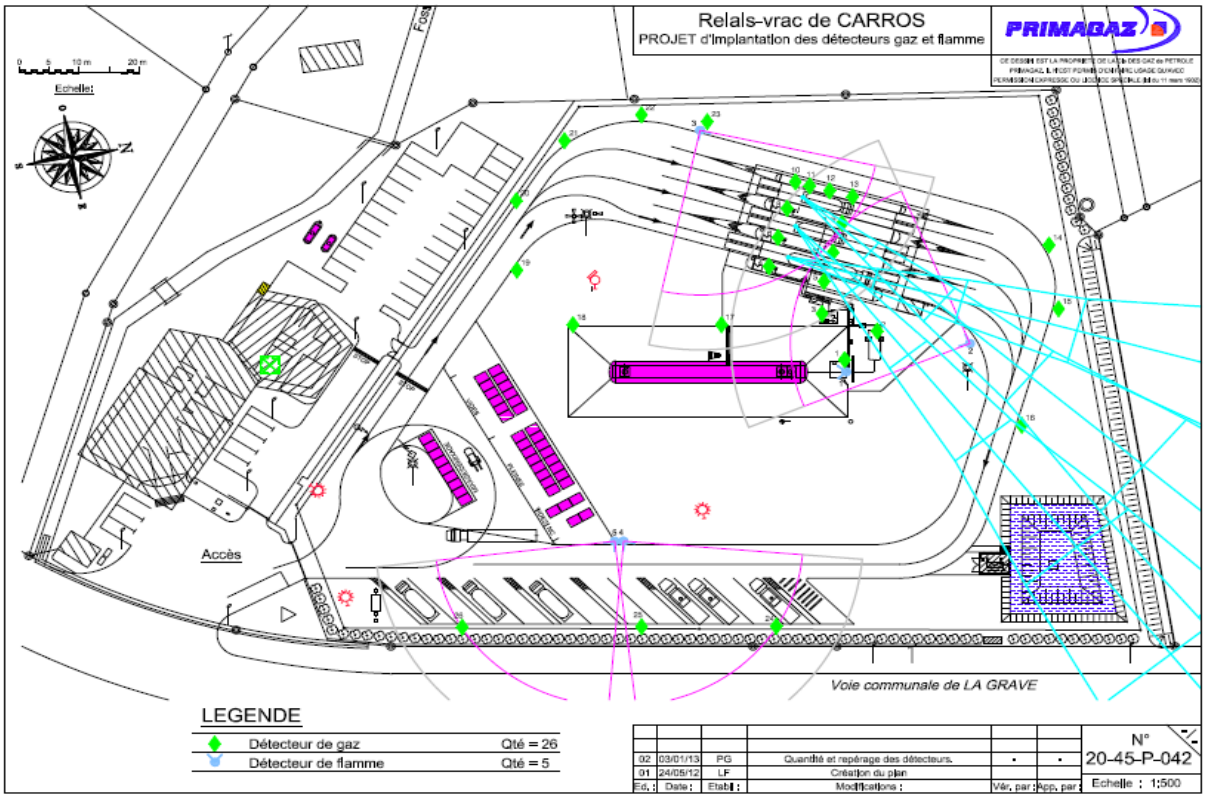


Figure VI. 1. Implémentation des détecteurs Gaz et Flamme dans le site.

Conformément à la réglementation de l'arrêté du 10 Mai 1993 (abrogé par le décret ministériel du 2 Janvier, 2008), deux seuils de détection sont définis et exigés :

- Un premier à 20% de la LIE (Limite inférieure d'Explosivité qui mesure la concentration minimale au-dessus de laquelle celui-ci peut être enflammé) qui entraîne la mise en marche d'une sirène d'alarme au personnel et la transmission à la télésurveillance.

- Un second seuil, à 50% de la LIE, qui entraîne la mise en sécurité du site : fermeture des vannes automatiques, des clapets internes des stockages fixes, arrêt des pompes et compresseurs par coupure de l'électricité industrielle, alarme sirène et transmission télésurveillance.

Le tableau VI.1 ci-dessous présente pour chaque équipement le type et les opérations de maintenance effectués sur l'équipement, la durée que chaque opération nécessite, par qui (des opérateurs internes du site ou externe) ces tâches sont réalisées, la périodicité (la fréquence des tâches de maintenance) et le type d'énergie généré par l'équipement.

Ce tableau permet de donner une idée globale sur le système étudié en définissant les opérations de maintenance les plus importants des équipements choisis.

En somme, cette étape permet d'identifier le système étudié et détermine les interventions de maintenance les plus importantes susceptible de créer des scénarios de défaillance des équipements.

TABLEAU VI. 1. IDENTIFICATION ET MODÉLISATION DU SYSTÈME (1ère ÉTAPE DE MODÈLE MOSAR-UML).

Equipement	Composants de sécurité	Type Maintenance	Opérations de Maintenance	Durée	Qui (Interne/ Externe)	Périodicité	Énergie
Compresseurs	Piège à liquide Pressostat à refoulement Soupape de sécurité	Contrôle visuel	- Vérification de la pression de refoulement du compresseur. - Lubrification. - Vérification de la pression et le niveau d'huile du carter. - Inspection de l'ensemble des soupapes. - Nettoyage des surfaces de compresseur.	- 1h - 2h - 20min - 4h - 3h	Interne	Semestrielle	Pneumatique Electrique
Pompes	Joint Brides Garniture Clapet anti-retour	Contrôle visuel	- Remplacement des joints. - Contrôle visuel de la peinture. - Démontage/Montage des pièces. - Réglage de la garniture mécanique. - Dégazage de la garniture. - Graissage modéré. - Test du bon fonctionnement du clapet anti-retour à recirculation.	- 3h - 10min - 4h - 2h - 1h30 - 2h - 2h	Interne	Semestrielle	Electrique
Bras Gaz/Liquide	Vanne	Contrôle visuel	- Test de manœuvrabilité. - Lubrification. - Vérification de la structure du bras. - Vérification de la présence goupille ou écrou. - Contrôle de fuite.	- 3h - 2h - 3h - 2h - 8h	Interne	15jours	Electrique
	Boitier de rupture "Flip-Flap"	Visite			Externe	Annuelle	
		Inspection visuelle			Interne	Semestrielle	
Détecteurs Gaz/Flamme	Capteurs Alarmes	- Contrôle visuel - Contrôle de sensibilité	- Vérification de l'état des détecteurs (corrosion, oxydation, humidité, poussiéreux). - Nettoyage. - Vérification de l'étalonnage. - Test de déclenchement de l'alarme. - Vérification des seuils d'alarme.	- 1h - 4h - 2h - 3h - 30min	Fournisseur	Semestrielle	Electrique

1.2. Identification des dangers et les principaux scénarios d'accidents

L'identification des dangers et les principaux scénarios d'accident est la 2ème étape de la méthode MOSAR-UML. Cette étape vise à analyser les risques associés aux scénarios de défaillance choisis, et met en évidence le lien entre les scénarios de défaillance des opérations de la maintenance et le processus de l'apparition des événements redoutés et les phénomènes dangereux dans laquelle une situation normale devient dangereuse en présence des événements déclencheurs. Ces informations sont présentées dans le tableau VI.3 du modèle MOSAR-UML.

Un scénario se définit comme une séquence d'évènements qui s'enchaînent ou se combinent pour donner lieu à une libération d'énergie ou d'une substance, c'est-à-dire à l'apparition d'un phénomène dangereux.

Chaque équipement sélectionné subit et encourt plusieurs scénarios de défaillance. Une liste des scénarios de défaillance liés à chaque équipement est présentée dans l'annexe A. les scénarios les plus importants sont choisis, qui présentent un intérêt dans la modélisation et la simulation, qui portent une contribution au service de maintenance, et qui sont à risque. Ce choix a été fait par le responsable de maintenance de l'entreprise (Annexe C). Les scénarios retenus sont les suivants (Tableau VI.2).

TABLEAU VI. 2. LES SCÉNARIOS DE DÉFAILLANCE CHOISIS POUR LA MODÉLISATION ET SIMULATION (Gallab *et al.*, 2016a).

Equipements	Scénarios de défaillance	Conséquences (Pourquoi le choix de ces scénarios)
Bras Gaz/Liquide	Manque d'attention lors d'une opération de raccordement de bras de chargement camion et de l'ouverture de la vanne manuelle.	Apparition d'un UVCE et jet flamme.
	Non réalisation du contrôle annuel de l'usure de filetage de l'écrou du bras.	Apparition d'un UVCE en fonctionnement matériel avec définition de la zone des effets et d'un possible jet flamme en complément.
Pompes	Blocage de clapet cessant la recirculation du fluide.	Dégradation de la pompe et apparition d'un UVCE.
	Dépannage de la pompe avec une garniture fuyarde.	Apparition d'un UVCE en fonctionnement matériel avec définition de la zone des effets et d'un possible jet flamme en complément.
	Mauvais alignement de la tuyauterie provoquant une usure prématurée des roulements ou des coussinets de la pompe.	Défaut de maintenance d'un matériel conduisant à un UVCE ou un jet enflammé.

	Coupure du joint torique de la chemise de garniture lors du remontage de la garniture à cause de la non-protection du filetage de l'arbre.	Défaut de maintenance d'un matériel conduisant à un UVCE ou un jet enflammé.
Compresseurs	Mise en route du compresseur gaz avec les vannes d'isolement fermées.	Défaut matériel ou défaut d'application de la consigne de mise en route.
	Mauvais nettoyage ou non remplacement d'une soupape usée/détériorée.	Défaut de prestation d'un personnel Primagaz dans le non respect d'une consigne de maintenance – NC opérationnel).
Détecteurs Gaz/Flamme	Mauvais étalonnage des détecteurs.	Défaillance opérationnelle altérant la fiabilité de la chaine MMRi.
	Non vérification des seuils de déclenchement de pré-alarme et d'alarme.	Défaillance opérationnelle altérant la fiabilité de la chaine MMRi.

Ces scénarios de défaillance liés à la maintenance génèrent des événements redoutés qui conduisent à des risques et à des phénomènes dangereux qui sont expliqués dans le chapitre II.

Les événements redoutés qui mènent à ces phénomènes dangereux seront quantifiés dans la section suivante selon trois paramètres : probabilité, gravité, et détectabilité.

TABLEAU VI. 3. IDENTIFICATION DES DANGERS ET LES PRINCIPAUX SCÉNARIOS D'ACCIDENTS (2ème ÉTAPE DE MODÈLE MOSAR-UML).

Equipement	Scénarios de défaillance	Evénement déclencheur	Source de danger	Causes	Evénement redouté	Phénomène dangereux	Type dommage
Compresseur	Mise en route du compresseur gaz avec les vannes d'isolement fermées.	Vanne aval fermée.	- Equipement. - Operateur.	- Défaut d'application de la consigne de mise en route. - Défaut de matériel. - Défaut de prestation d'un personnel dans le non respect d'une consigne de maintenance.	- Ruine du compresseur - Perte de confinement du compresseur	- Surchauffe. - Surpression. - Apparition d'un UVCE. - Jet flamme.	- Technique - Humain - Organisationnel.
	Mauvais nettoyage ou non remplacement d'une soupape usée/détériorée.	Liquide dans compresseur de gaz.					
Pompe	Blocage de clapet cessant la recirculation du fluide.	- Coup de bélier. - Usure.	- Equipement. - Operateur.	- Défaut de maintenance d'un matériel. - Défaut de matériel. - Défaillance intrinsèque.	- Fuite de joint de la pompe. - Fuite de brides. - Fuite de garniture.	- Dégradation de la pompe. - Apparition d'un UVCE. - Jet flamme.	- Technique - Humain - Environnemental.
	Dépannage de la pompe avec une garniture fuyarde.						
	Mauvais alignement de la tuyauterie provoquant une usure prématurée des roulements ou des coussinets de la pompe.						
	Coupure du joint torique de la chemise de garniture lors du remontage de la garniture à cause de la non-protection du filetage de l'arbre.						
Bras Gaz/Liquide	Non réalisation du contrôle annuel de l'usure de filetage de l'écrou du bras.	Non respect du planning de maintenance	- Operateur	- Erreur opératoire.	- Fuite sur bras. - Arrachement de bras.	- Brûlure. - Echappement du propane liquide. - Apparition d'un UVCE. - Jet flamme.	- Humain.
	Manque d'attention lors d'une opération de raccordement de bras de chargement camion et de l'ouverture de la vanne manuelle.						
Détecteurs Gaz/Flamme	Mauvais étalonnage des détecteurs.	Non déclenchement de l'alarme	- Equipement. - Environnement.	- Défaillance opérationnelle altérant la fiabilité de la chaîne MMRi. - Détérioration. - Mauvais nettoyage. - Erreur opératoire.	- Fuite non détectée. - Perte de confinement des installations.	- Apparition d'un UVCE. - Jet flamme.	- Technique
	Non vérification des seuils de déclenchement de pré-alarme et d'alarme.						

1.3. Quantification des risques

Les événements redoutés identifiés à l'étape précédente sont évalués en fonction de trois paramètres (gravité, probabilité et détectabilité). Chaque paramètre prend l'une des valeurs définies.

1.3.1. Gravité

L'échelle d'appréciation de la gravité des conséquences humaines d'un accident à l'extérieur des installations est donnée par l'arrêté ministériel français du 29 Septembre 2005.

Pour tout phénomène dangereux, une cartographie des zones d'effets est nécessaire pour la délimitation des différentes zones de dangers pour la vie de l'homme :

- Les seuils des effets irréversibles (SEI) délimitant la « zone des dangers significatifs pour la vie humaine » ;
- Les seuils des effets létaux (SEL) délimitant la « zone des dangers graves pour la vie humaine » ;
- Les seuils des effets létaux significatifs (SELS) délimitant la « zone des dangers très graves pour la vie humaine ».

Les valeurs de la gravité sont relatives aux seuils d'effets délimitant les zones déterminées, en lui associant un indice pour le calcul de la criticité. Cet indice ne fait pas partie de l'arrêté mais nous l'avons ajouté pour faciliter l'analyse et le calcul de la criticité (Tableau. VI.4).

TABLEAU VI. 4. PARAMÈTRE DE GRAVITÉ.

Valeur de la gravité	Zone délimitée par le seuil des effets létaux significatifs	Zone délimitée par le seuil des effets létaux	Zone délimitée par le seuil des effets irréversibles sur la vie humaine	Indice
Désastreux	Plus de 10 personnes exposées.	Plus de 100 personnes exposées	Plus de 1000 personnes exposées.	5
Catastrophique	Moins de 10 personnes exposées.	Entre 10 et 100 personnes exposées.	Entre 100 et 1000 personnes exposées.	4
Important	Au plus 1 personne exposée	Entre 1 et 10 personnes exposées.	Entre 10 et 100 personnes exposées.	3
Sérieux	Aucune personne exposée	Au plus 1 personne exposée	Moins de 10 personnes exposées.	2
Modérée	Pas de zone de létalité hors de l'établissement.		Présence humaine exposée à des effets irréversibles inférieure à « une personne ».	1

1.3.2. Probabilité

La probabilité d'occurrence d'un phénomène a été associée à un indice de probabilité tel que définie dans l'arrêté du 29 Septembre 2005, relatif à l'évaluation et à la prise en compte de la

probabilité d'occurrence, de la cinétique, de l'intensité des effets et de la gravité des conséquences des accidents potentiels (Tableau VI.5).

TABLEAU VI. 5. PARAMÈTRE DE PROBABILITÉ.

Indice de probabilité	**5**	**4**	**3**	**2**	**1**
Valeur de la probabilité	Evénement courant	Evénement probable	Evénement improbable	Evénement très improbable	Evénement possible mais extrêmement peu probable
Classe de probabilité	$10^{-2} \leq P < 10^{-1}$	$10^{-3} \leq P < 10^{-2}$	$10^{-4} \leq P < 10^{-3}$	$10^{-5} \leq P < 10^{-4}$	$10^{-6} \leq P < 10^{-5}$

1.3.3. Détectabilité

La détectabilité est définie comme suit :

- ✓ Facilement détectable: Apparent à tout le personnel;
- ✓ Petit signe: Détection aisé par un opérateur formé;
- ✓ Pas de signe: difficile à détecter, d'où l'utilisation obligatoire des instruments de mesure;
- ✓ Expertise: très difficile à détecter, il nécessite des capteurs ou des détecteurs de niveau.

Pour chaque valeur de détectabilité est associée à un indice tel que décrit dans le tableau VI.6. Le paramètre de détectabilité est posé selon notre analyse en concertation avec le service maintenance. Ce paramètre sera utilisé pour évaluer la détection d'un événement redouté et dans le calcul de la criticité par la suite.

TABLEAU VI. 6. PARAMÈTRE DE DÉTECTABILITÉ.

Indice détectabilité	**1**	**2**	**3**	**4**
Valeur de détectabilité	Facilement détectable	Petit signe	Pas de signe	Expertise

La criticité est calculée automatiquement à partir de ces trois paramètres (Gravité, Probabilité, Détectabilité) et grâce au modèle MOSAR-UML.

Les tableaux ci-dessous (Tableau VI.7 et VI.8) présentent les effets générés par chaque événement redouté et les résultats de la quantification de ces événements redoutés (le calcul de la criticité à partir de la gravité, la probabilité et la détectabilité).

TABLEAU VI. 7. QUANTIFICATION DES RISQUES (3ème ÉTAPE DE MODÈLE MOSAR-UML).

Equipement	**Evénement redouté**	**Type d'Effet**	**Gravité**	**Probabilité**	**Détectabilité**	**Criticité**
Compresseur	Ruine du compresseur	Thermique Surpression	4	2	1	8
Pompe	Fuite sur pompe	Thermique Surpression	1	3	2	6

Bras Gaz/Liquide	Fuite sur bras	Thermique Surpression	1	3	1	3
	Arrachement de bras		5	3	1	15

Par contre, les détecteurs ne sont pas comme les autres équipements, ce sont des mesures d'atténuation, ils ne génèrent pas des risques, mais ils sont utilisés pour les réduire, de sorte que leur gravité est égale à 0. En effet, leur gravité réside dans la non-détection d'un problème ou dans la fuite des autres équipements. Par conséquent, la gravité est substituée par LIE (Limite Inférieure d'Explosivité).

TABLEAU VI. 8. QUANTIFICATION DES RISQUES DES DÉTECTEURS (3ème ÉTAPE DE MODÈLE MOSAR-UML).

Equipement	Evénement redouté	Type d'Effet	LIE	Probabilité	Détectabilité	Criticité
Détecteur Gaz/Flamme	Perte de confinement sur les installations	Thermique Surpression Propane	1.8	5	1	9

Le calcul de la criticité permet de classifier les événements redoutés les plus critiques afin d'implémenter des mesures de sécurité pour éviter les risques susceptibles de surgir.

1.4. Mesures de sécurité

Nous avons modifié le modèle MOSAR-UML en ajoutant la 4ème étape de la méthode MOSAR qui porte sur la définition des mesures et barrières de sécurité. Cette étape est indispensable pour notre étude, pour présenter les différentes barrières de sécurités implémentées pour chaque équipement.

Les phénomènes dangereux sont maîtrisés par des barrières de sécurité dites aussi Mesures de Maîtrise des Risques (MMR).

Une MMR est un dispositif ou une tâche destinée à prévenir l'occurrence ou à limiter les conséquences d'un événement redouté susceptible de conduire à un phénomène dangereux, afin d'assurer la fonction de sécurité.

Les barrières de sécurité peuvent être des barrières de prévention ou de protection. Une barrière de sécurité de prévention permet de prévenir ou de limiter l'occurrence de l'événement redouté. Une barrière de sécurité de protection permet de diminuer les conséquences de l'événement redouté (Garbolino, 2008).

Les barrières de sécurité retenues (ou MMR) peuvent être des mesures techniques qui sont constituées d'un dispositif de sécurité ou d'un système instrumenté de sécurité qui s'oppose à l'enchaînement d'évènements susceptible d'aboutir à un accident; des mesures organisationnelles qui sont constituées d'une activité humaine qui s'oppose à l'enchaînement d'évènements susceptible d'aboutir à un accident, ou bien des mesures mixtes.

Chaque barrière de sécurité est évaluée à l'aide d'un niveau de confiance. Le niveau de confiance est l'architecture et la classe de probabilité, inspirés des normes NF EN 61-508 et CEI 61-511, pour qu'une barrière, dans son environnement d'utilisation, assure la fonction de sécurité pour laquelle elle a été choisie. Cette classe de probabilité est déterminée pour une efficacité et un temps de réponse donnés.

Ces mesures assurent au mieux les fonctions de sécurité contribuant à maîtriser les risques d'accidents.

Le tableau de la 4ème étape du modèle MOSAR-UML (tableau VI.9) décrit les barrières de sécurité convenable pour chaque équipement en précisant son type, sa fonction de sécurité (prévention ou protection), une description de son fonctionnement et son principe, l'évaluation de son efficacité et son niveau de confiance.

Le niveau de confiance est déterminé selon la base de données de fiabilité du retour d'expérience du site ou selon la base de données du projet ARAMIS (Accidental Risk Assessment Methodology for IndustrieS in the context of the Seveso II Directive. Projet européen du 5ème programme cadre dont la participation de l'INERIS). Pour les barrières organisationnelles, le niveau de confiance est déterminé par la méthode proposée par l'INERIS dans (Vallee and Dolladille, 2003) pour les barrières de protection, et pour les barrières de prévention le NC est déterminé par la méthode adopté par l'INERIS (Lee and De Dianous, 2008).

TABLEAU VI. 9. MESURES DE SÉCURITÉ.

Equipement	Barrière de sécurité	Type	Fonction de sécurité	Description	Efficacité	Niveau de confiance
Compresseur	Pressostat du compresseur	Tech	Prévention des défaillances mécaniques.	Protéger le compresseur contre toute baisse anormale de la pression d'aspiration. Le pressostat est un organe capable de placer un contact dans une certaine position (rôle d'interrupteur électrique) sous l'effet d'une détection de pression. La détection d'un certain niveau de pression entraîne l'arrêt du compresseur.	100%	1
	Ballon anti-envahissement du compresseur.	Tech	Prévention des défaillances mécaniques.	Les compresseurs sont conçus pour comprimer des gaz, l'entrée d'une quantité, même minime, de liquide dans le compresseur peut provoquer des dommages importants. Le ballon anti-envahissement permet de piéger le liquide avant l'entrée dans le compresseur et de l'arrêter, par l'intermédiaire d'un capteur, en cas de niveau haut de liquide. Le piège utilise un détecteur de niveau électrique. Si le niveau de liquide augmente de trop, l'interrupteur de niveau intervient dans le circuit de commande du moteur pour arrêter le compresseur.	100%	1
Pompe	Protection de la pompe (Circuit de circulation)	Tech	Prévention	Une surpression en aval de la pompe provoque l'ouverture d'un clapet qui permet la recirculation du fluide. Cette recirculation permet de maintenir un débit minimum qui évite la dégradation de la pompe.	100%	1
	Pressostat de la pompe	Tech	Prévention des défaillances mécaniques.	Protéger la pompe contre toute baisse anormale de la pression d'aspiration. Le pressostat est un organe capable de placer un contact dans une certaine position (rôle d'interrupteur électrique) sous l'effet d'une détection de pression. La détection d'un certain niveau de pression entraîne l'arrêt de la pompe.	100%	1
Bras Gaz/Liquide	Boitier de rupture « Flip-Flap »	Tech	Protection Isoler une fuite non enflammée.	Les boîtiers de rupture sont prévus pour être des points de rupture privilégiés en cas de sollicitation anormale du bras. Ils sont prévus aussi pour isoler les deux parties du bras arrachés par la fermeture automatique de clapets de part et d'autre du point de rupture. La quantité de gaz relâchée en cas d'arrachement de bras est très limitée.	100%	1
	Chaîne de détection gaz	Tech	Protection Isoler une fuite non enflammée	La chaîne permet de couper l'électricité industrielle (alimentation des commandes des électrovannes, des pompes et des compresseurs) à partir de la détection d'une concentration prédéfinie de gaz dans l'atmosphère, ce qui entraîne la mise en sécurité du site.	100%	3
Détecteurs Gaz/Flamme	Contrôle					
	Remplacement des capteurs					

La modélisation avec l'approche MOSAR-UML permet de donner une vue globale sur le système étudié avec ces différentes interactions afin d'identifier le système, définir les scénarios de défaillance et leurs dangers associés, évaluer les événements redoutés générés par ces scénarios de défaillance, et présenter les barrières de sécurité convenable pour les équipements choisis pour éviter de tomber dans les dangers.

Le modèle MOSAR-UML permet d'obtenir une base de données qui sera utilisée comme un système d'information pour l'apprentissage des accidents et qui sera utilisée par le Système Multi-Agent dans la simulation.

2. SIMULATION DU COMPORTEMENT DU SYSTÈME ETUDIÉ

Ce travail vise à simuler les scénarios de défaillance des activités de maintenance afin de calculer la criticité de chaque équipement et d'obtenir un niveau de risque du système global. L'objectif est de développer un tableau de bord qui affiche les indicateurs de performance liés aux activités de maintenance à savoir la fiabilité, la disponibilité, la maintenabilité, le taux de défaillance. D'autres indicateurs sont liés aux ressources humaines (opérateurs). Les résultats de la simulation sont présentés dans (Gallab *et al.*, 2016a ; 2016b).

Le système étudié est représenté dans la figure VI.2 avec les différents éléments qui le composent.

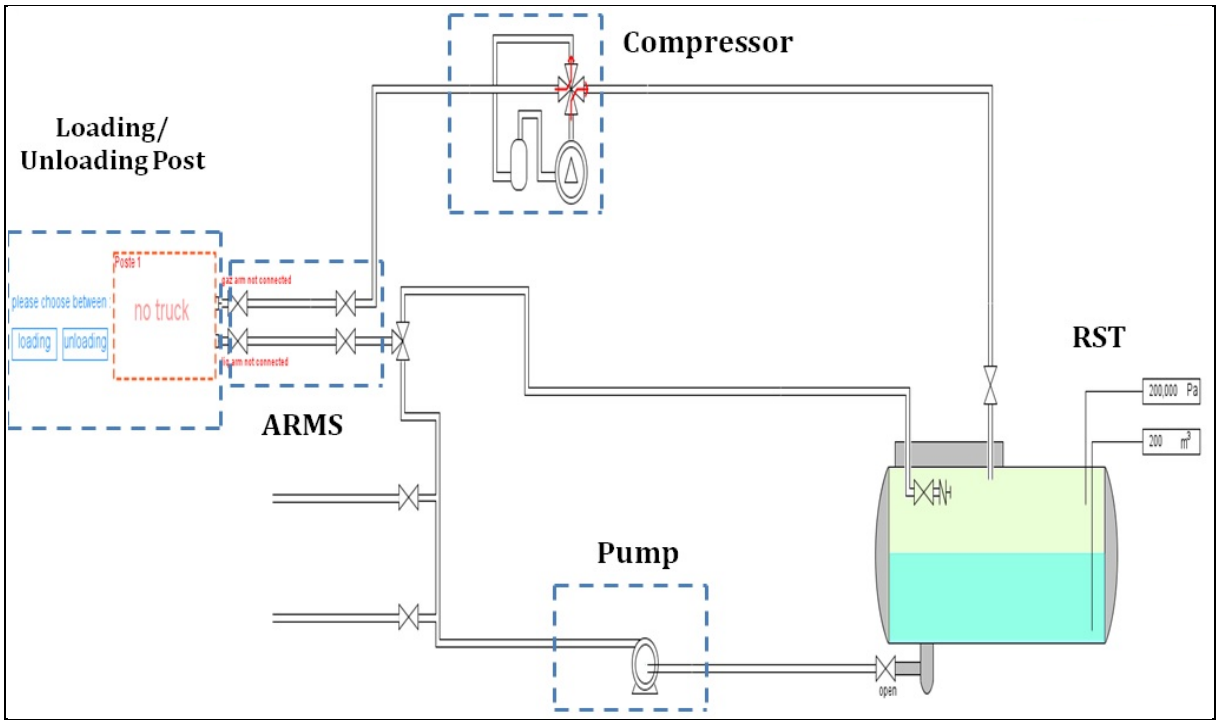


Figure VI. 2. Architecture du système étudié.

L'architecture de SMA proposée dans le chapitre V comporte les agents suivants :

- Agent Machine et Agent Evaluateur qui se manifestent dans :

- ✓ Agent Compresseur: Cet agent présente l'équipement compresseur avec ses différentes caractéristiques, l'évaluation de ses états ainsi que le calcul de la criticité à partir des trois paramètres;
- ✓ Agent Pompe : définit l'équipement Pompe avec ses divers états et variations;
- ✓ Agent Bras: représente le bras liquide pour le chargement et le bras gaz/ liquide pour le déchargement, avec ses différents états et ses évaluations;
- ✓ Agent Détecteurs : représente le fonctionnement des détecteurs gaz et flamme.

- Agent Opérateur (Operator Agent): cet agent assure la vérification du chauffeur de camion, et assure également les interventions de maintenance lorsqu'un problème survient au sein de l'installation technique.

- Planner Agent qui est l'Agent Installation Technique: illustre les équipements qui constituent le système étudié (pompe, compresseur, bras liquide / gaz et détecteurs), gère et assure l'écoulement de gaz/liquide dans le système étudié. L'agent Installation Technique envoie un message pour demander une intervention à l'opérateur qui lui montre l'emplacement du problème et sur quel équipement exactement.

D'autres agents ont été ajoutés qui ne sont pas définis dans le modèle conceptuel, et qui présentent la cadre et l'environnement de l'étude de cas :

- Agent Poste de chargement/déchargement (Loading/Unloading Post): cet agent représente l'environnement dans lequel les autres agents travaillent. C'est un agent qui assure le respect des différentes opérations de chargement et déchargement.

- Agent Camion (Truck Agent): montre le camion avec sa capacité et la pression à l'intérieur du réservoir.

- Agent Chauffeur (Driver Agent): met en évidence le chauffeur de camion qui effectue les opérations de chargement/déchargement.

2.1. Simulation du système en fonctionnement normal

Le fonctionnement normal du système est réalisé en deux phases (chargement ou déchargement de GPL). Une fois la simulation est lancée, l'utilisateur peut choisir entre deux boutons: Chargement ou déchargement que le chauffeur va effectuer. Ces deux phases sont toujours précédées par l'identification et la vérification de la conformité du camion et du chauffeur avant qu'il entre au site relais vrac.

2.1.1. Vérification Camion

Le modèle de simulation fournit la vérification camion (fig.VI.3) avant de procéder à des opérations de chargement /déchargement afin d'assurer la conformité des camions pour éviter des fuites pouvant créer des explosions. Les opérations de vérification sont présentées dans le chapitre II, figure II.7.

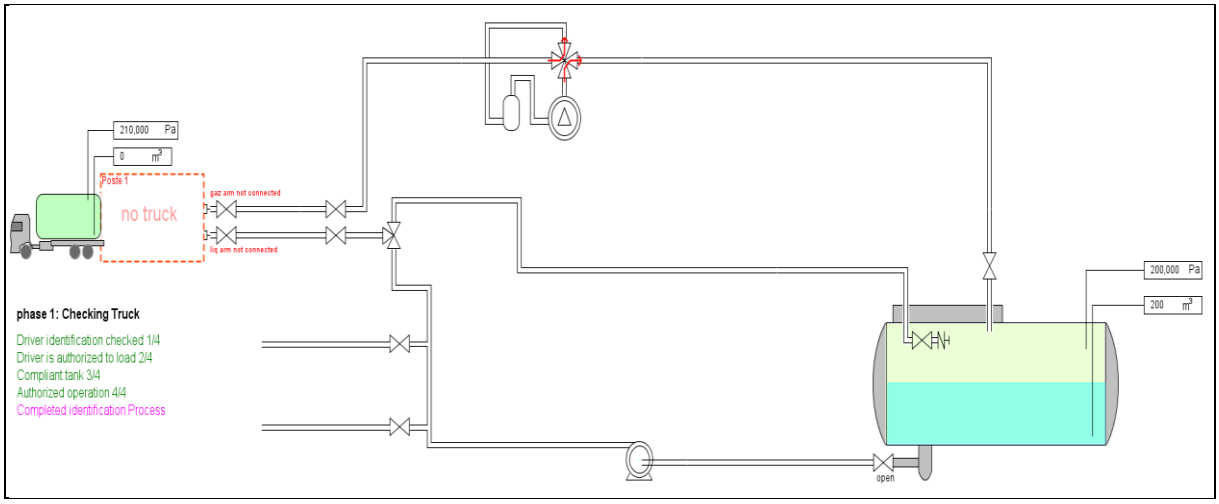


Figure VI. 3. Simulation AnyLogic pour la vérification Camion.

2.1.2. Opérations de chargement

Après la vérification de l'identification, le camion est positionné dans le poste de chargement pour le chargement de camions citernes petit-porteur tel que représenté sur la figure VI.4.

En cliquant sur le bouton « Loading », le système vérifie la connexion et le branchement des dispositifs (bras liquide, DCMT (Dispositif de Contrôle de Mise à la Terre), CISC (Coupleur Intelligent de Sécurité pour Camion GPL), les connexions, …), ainsi que l'ouverture des vannes. Une fois la pompe est activée, le camion commence à se charger. La simulation permet de suivre la capacité et la pression au sein de la citerne soit de camion ou de réservoir.

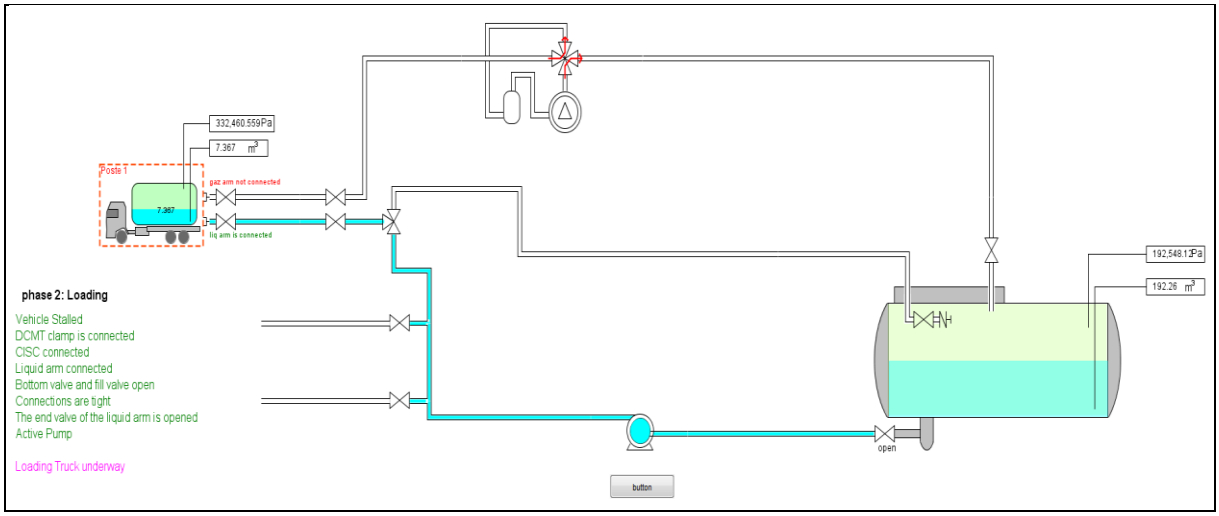


Figure VI. 4. Simulation des opérations de chargement.

Les opérations de chargement sont effectuées et assurés principalement par la pompe. La pompe est un équipement essentiel pour l'achèvement des opérations de chargement. Le fonctionnement normal de la pompe est décrit dans la figure VI.5.

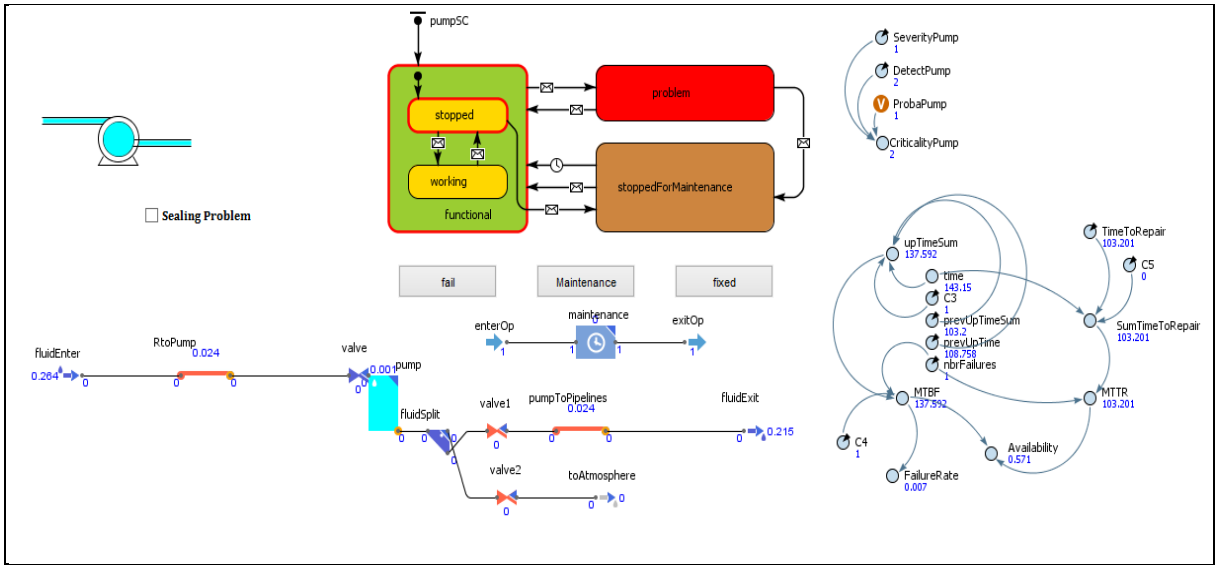


Figure VI. 5. Simulation de la pompe en fonctionnement normal.

2.1.3. Opérations de déchargement

Les opérations de déchargement du camion citerne gros-porteur ont eu lieu au sein du poste de chargement / déchargement. Le compresseur assure le déchargement de liquide (couleur bleu) et de gaz (couleur verte) comme l'a souligné la figure VI.6.

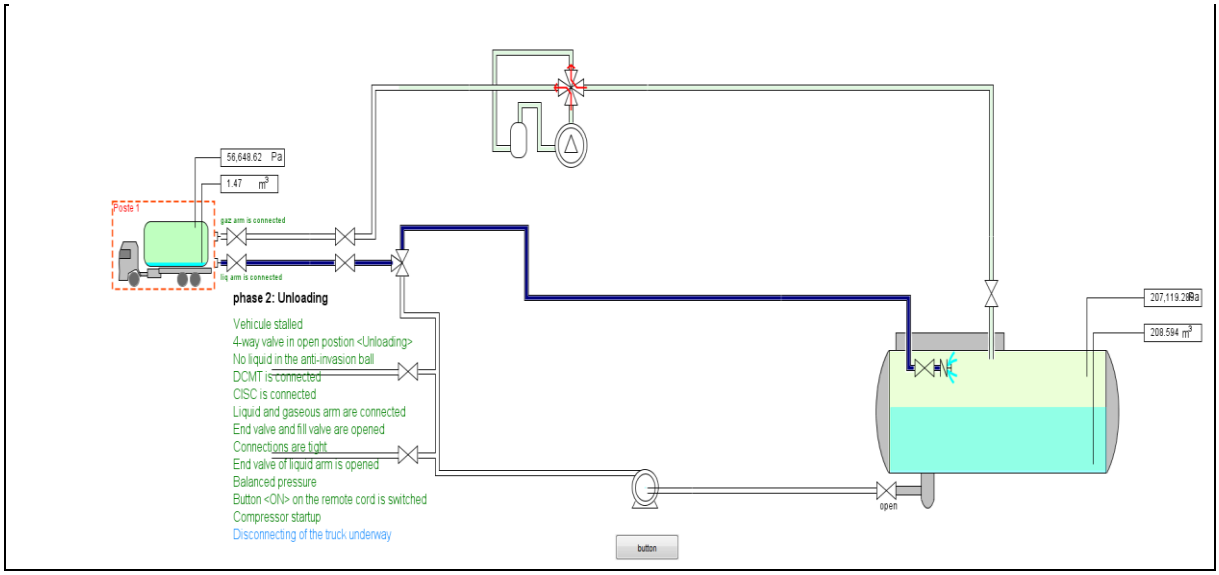


Figure VI. 6. Simulation AnyLogic des opérations de déchargement.

La figure VI.7 montre le fonctionnement double du compresseur : aspiration (couleur verte) et refoulement (couleur bleu).

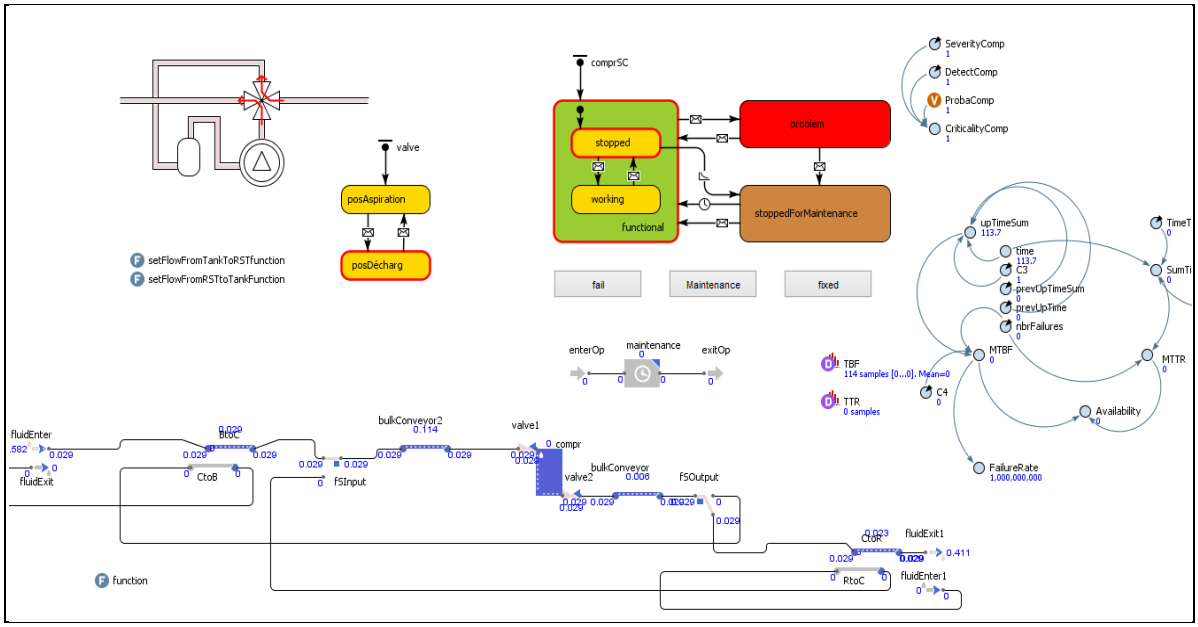


Figure VI. 7. Simulation du compresseur en fonctionnement normal.

Les opérations de chargement et déchargement ont été assuré par l'agent poste de chargement/déchargement. Cet agent a été programmé par des statecharts et des actioncharts comme illustré dans la figure VI.8, et la figure VI.9. Les différentes variables définies dans le modèle sont présentées dans l'Annexe B.

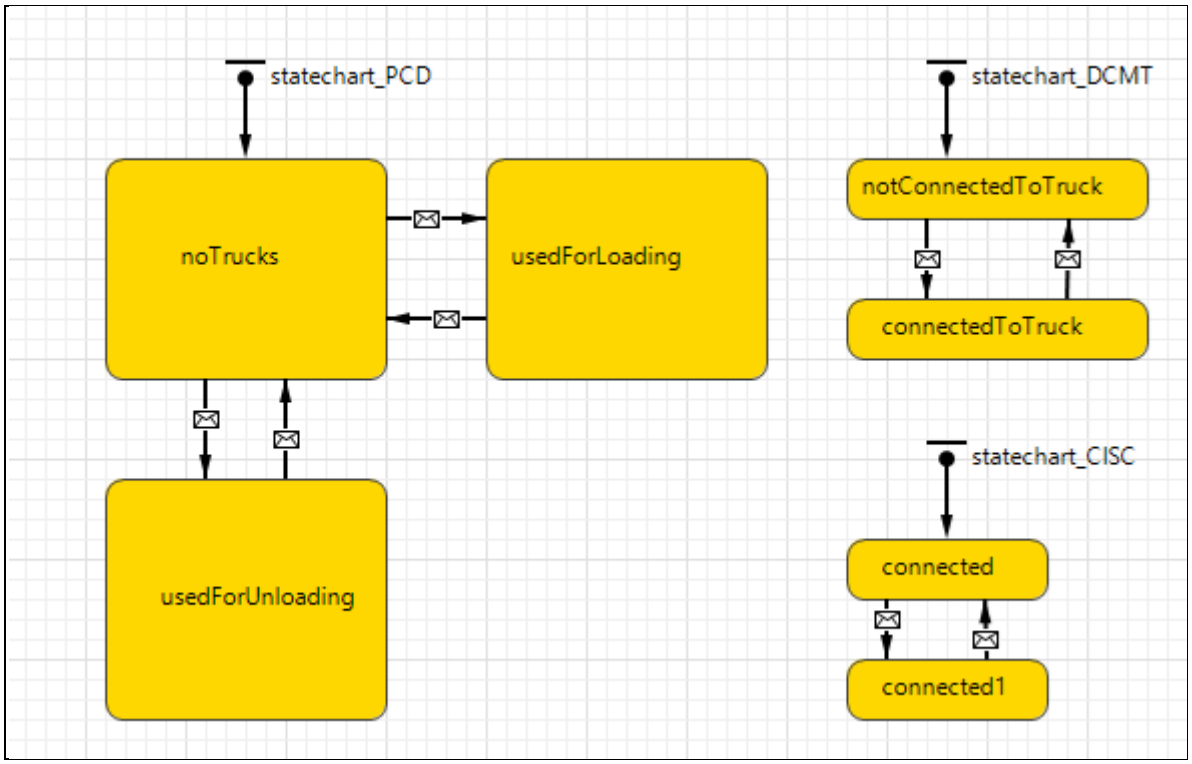


Figure VI. 8. Statecharts des différents dispositifs contenus dans le poste de chargement/déchargement.

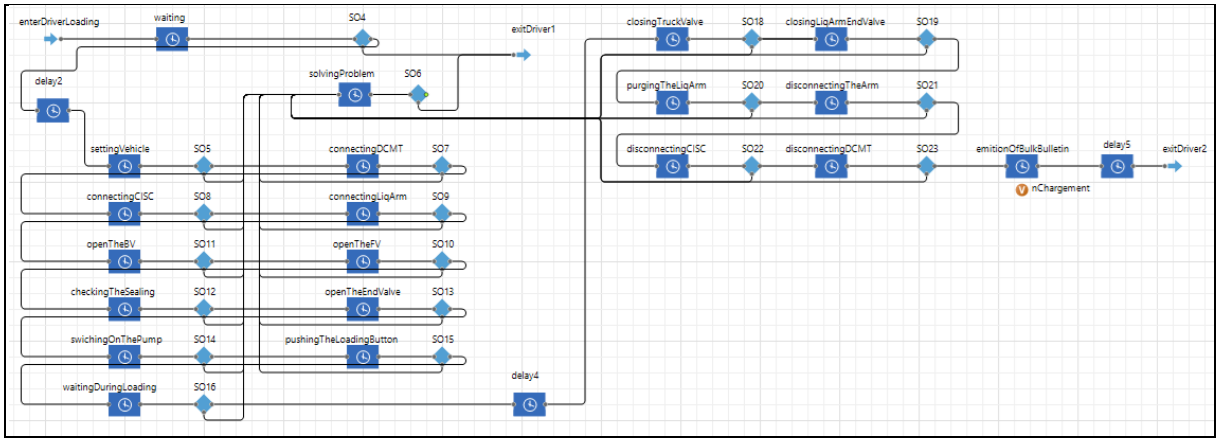


Figure VI. 9. Simulation des opérations de chargement par un actionChart.

Le transfert du GPL est effectué par le bras Gaz/ liquide. Cet équipement assure le transfert d'un liquide ou d'un gaz liquéfié d'une citerne à une autre (de réservoir RST vers le camion citerne ou vis versa). Le fonctionnement de bras gaz/liquide est montré dans la figure VI.10.

La figure VI. 10 présente la connexion de bras liquide (connecté, non connecté ou s'il y a un problème lors de la connexion) avec le camion par le statechart_BL, la position de la vanne (ouverte ou fermée), l'état de bras par statechart_BL2 (en bonne état, en mauvaise état ou arrêté pour la maintenance), s'il est vide ou contient de GPL par statechart_BL1, et la simulation de fonctionnement global de bras liquide avec ses composantes.

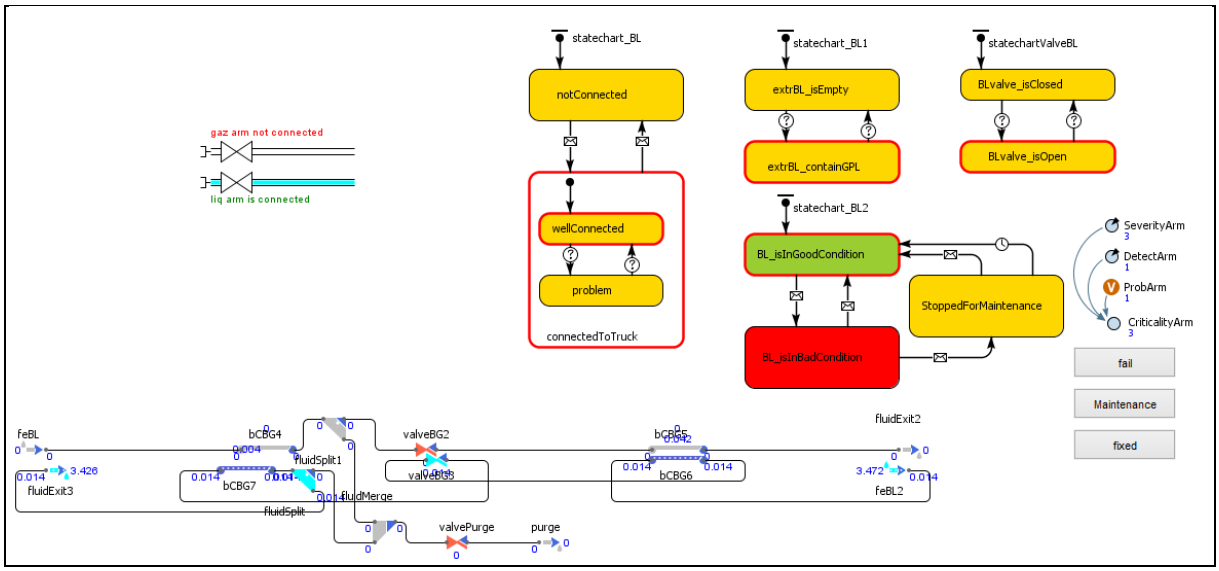


Figure VI. 10. Simulation de fonctionnement de bras.

2.2. Simulation des scénarios de défaillance

Chaque équipement sélectionné subit plusieurs scénarios de défaillance. Une liste de scénarios de défaillance liés à chaque appareil a été définie dans la section précédente. Les scénarios les plus importants sont choisis pour la simulation, qui visent à apporter une contribution au service de maintenance, et qui sont à risque pour le service et pour la chaîne logistique. Les scénarios simulés sont les suivantes (fig.VI.11).

Le simulateur développé permettra d'estimer la criticité pour chaque équipement en fonction de trois paramètres : la probabilité, la gravité et de la détectabilité (fig.VI.13). La gravité et la détectabilité sont initialement des paramètres fixes, alors que la probabilité varie selon une distribution de probabilité "PERT".

La distribution PERT est une distribution continue délimitée dans les deux côtés. C'est une distribution alternative à la distribution Triangulaire, il a les mêmes trois données d'entrées : le minimum, le plus probable, et le maximum. Toutefois, c'est une courbe lisse qui met moins l'accent sur les valeurs extrêmes. La distribution PERT est souvent utilisée dans des applications d'analyse des risques.

Occurrence de Probabilité = Valeur Initial de la ProbaEquipement + PERT (0, 1, 0.1)

Le seuil de criticité dépend de l'état de l'équipement (normal, dégradé ou arrêt). Le seuil est défini comme suit :

$C_{Equipment} \leq 2$: l'équipement est dans un état de fonctionnement (state = Working en vert);

$2 < C_{Equipment} \leq 8$: L'équipement est dans un état dégradé n'influençant pas le système global (state = preventive en bleu);

$C_{Equipment} > 8$: si la criticité de l'équipement est supérieure à 8, cela va causer un arrêt de l'équipement et pourra influencer sur le fonctionnement du système global qui est l'installation technique (state = corrective en rouge).

Donc la figure VI.11 montre le nombre de défaillance que chaque équipement subit et calcule sa criticité et détermine son état. Les scénarios de défaillance choisis pour la simulation sont définis dans le Tableau VI.2.

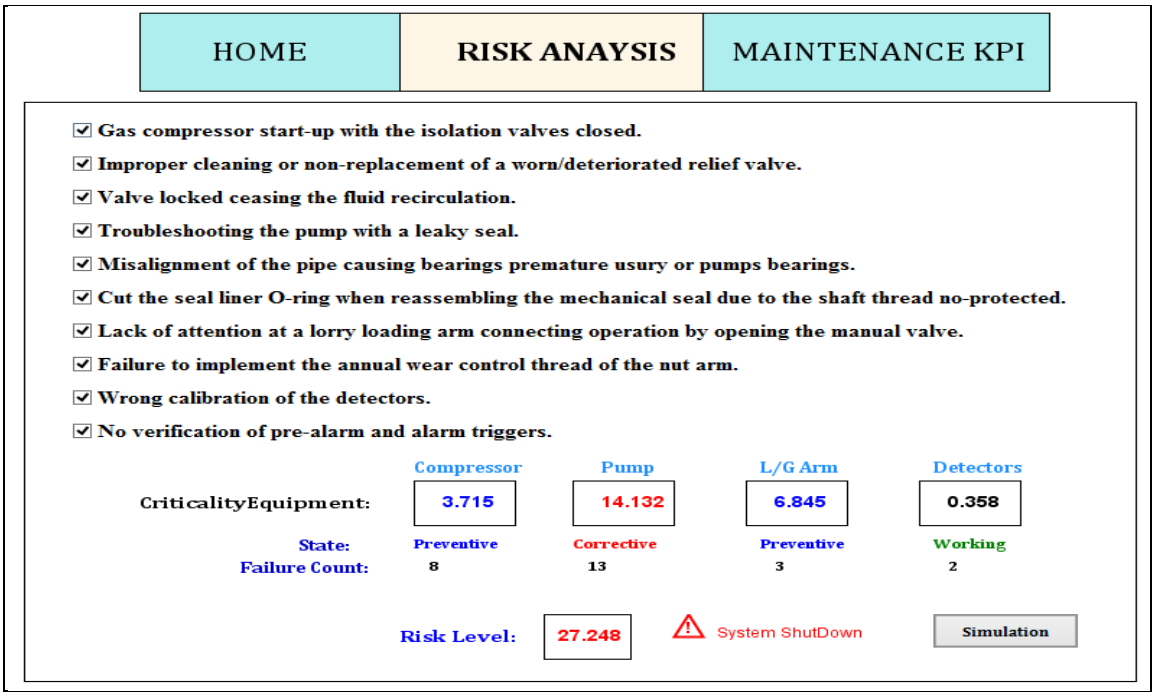


Figure VI. 11. Résultats de la simulation pour l'analyse des risques.

Le simulateur permet également le calcul du niveau de risque du système global :

Risk Level = ∑ Criticité de chaque équipement

= Cpump + Ccomp + Carm + Cdetectors

Si Risk Level ≤ 8 ➔ Le système en fonctionnement normal;
Si 8 <Risk Level ≤ 27 ➔ Le système en mode dégradé;
Si Risk Level > 27 ➔ Le système est en arrêt.

Si le niveau de risque est supérieur à 27, un message clignotant l'arrêt du système (fig. VI.11). En cliquant sur le bouton « Simulation », on obtient le résultat présenté dans la figure VI.12. Cette figure montre l'arrêt de chargement du camion et le détecteur de gaz avertit qu'il y a un problème au niveau de la pompe. Le fonctionnement du détecteur de gaz est représenté dans la figure VI.15.

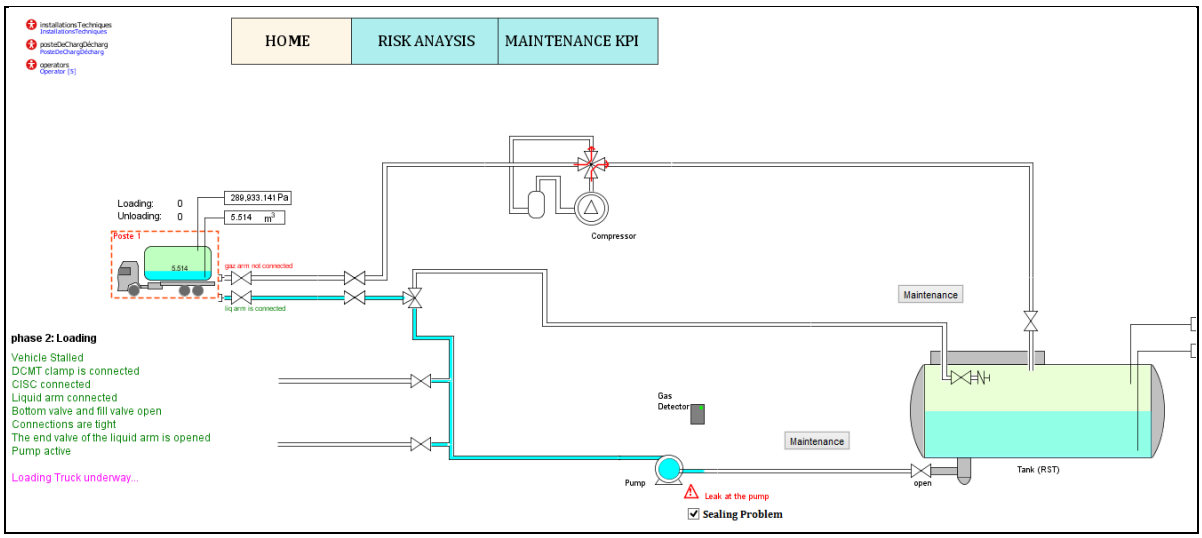


Figure VI. 12. Arrêt de système.

Lorsque la pompe tombe en panne, les vannes se ferment automatiquement (Fig.VI.13) et les opérations de chargement sont soudainement arrêtées. Une fois que la pompe tombe en panne, il envoie un message à l'agent opérateur pour effectuer une opération de maintenance.

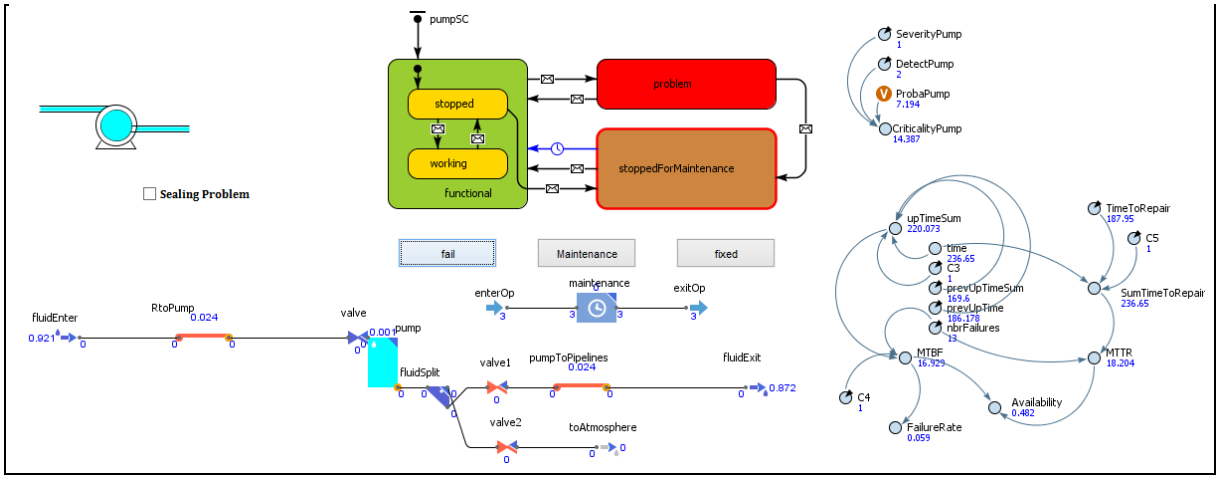


Figure VI. 13. Simulation de la pompe lors d'un arrêt.

Donc chaque équipement est présenté par un statechart avec trois états : état Fonctionnel, état Problème et état pour la maintenance. Si un équipement aurait besoin de la maintenance soit préventive ou corrective, il fait appel à l'Agent Opérateur. Ce dernier regarde la disponibilité de ses opérateurs et envoie un opérateur vers l'équipement sollicité (fig.VI.14).

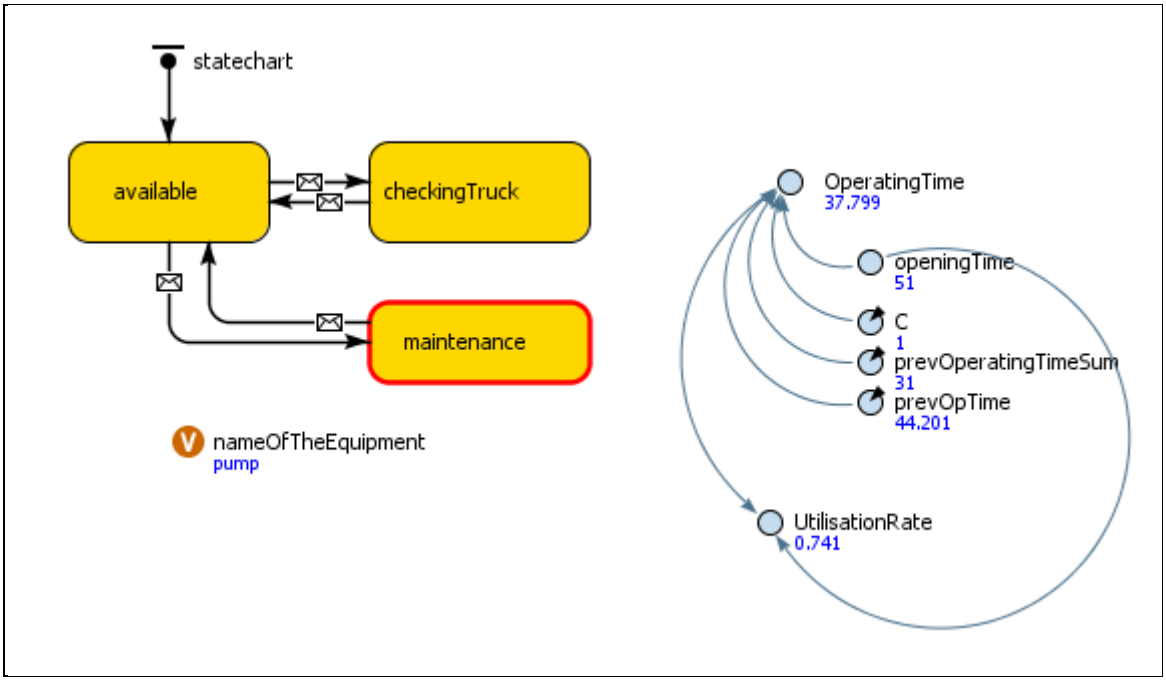


Figure VI. 14. Simulation de l'Agent Opérateur.

Les détecteurs sont des mesures d'atténuation, ils ne génèrent pas un risque, mais ils sont utilisés pour le réduire, de sorte que leur gravité est égale à 0. En effet, leur gravité réside dans la non-détection d'un problème ou d'une fuite dans un autre équipement. Par conséquent, la gravité est substituée par le degré de détection de LIE (Limite Inférieure d'Explosivité) (fig.VI.15).

Si $C_{Det} \leq 0.2 \times LIE$ ➔ Les détecteurs en fonctionnement normal;
Si $0.2 \times LIE < C_{Det} \leq 0.4 \times LIE$ ➔ Les détecteurs en mode dégradé;
Si $C_{Det} > 0.4 \times LIE$ ➔ Les détecteurs sont en dysfonctionnement.

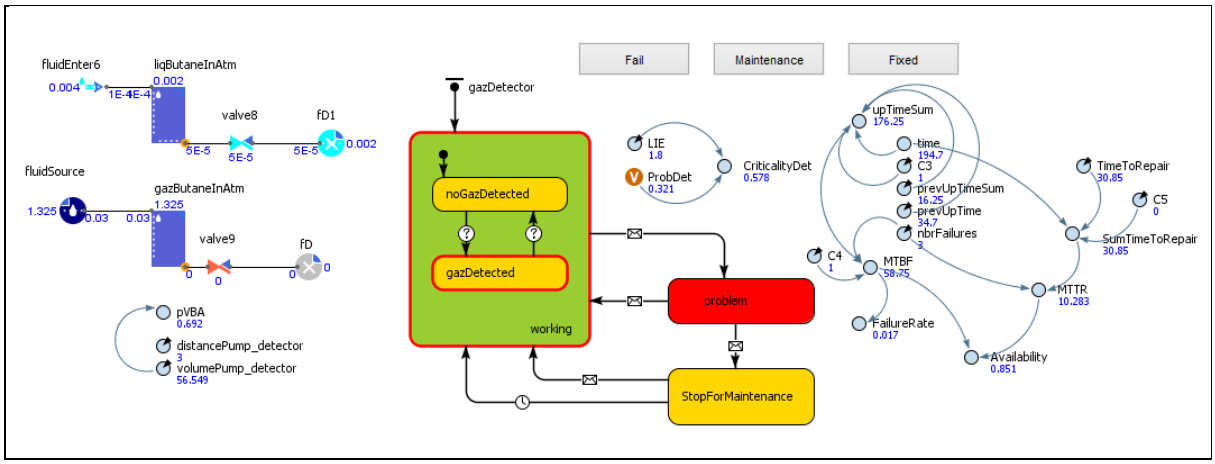


Figure VI. 15. Fonctionnement des détecteurs.

2.3. Simulation des Indicateurs de Performance de Maintenance (KPIs)

Les indicateurs de performance de maintenance sont utilisés pour évaluer l'efficacité de la maintenance effectuée (Wireman, 1998). Un indicateur est un produit de plusieurs mesures. Un indicateur de performance est une mesure capable de produire une valeur quantifiée pour indiquer le niveau de performance, tenant en compte un ou plusieurs aspects.

Un KPI de maintenance utile permet d'identifier les problèmes qui causent les effets de maintenance et aide à choisir la bonne stratégie pour supporter ou corriger les actions produisant les résultats. Il est important d'améliorer à la fois la fiabilité des équipements et de la performance de la maintenance.

Les indicateurs de performance aident à comprendre ce que fait la maintenance, ce qu'il réalise pour l'entreprise et ce qu'il peut faire davantage pour améliorer la performance opérationnelle. La performance de la maintenance peut être améliorée en le rendant plus efficace et plus efficiente. Une maintenance efficace est en train de faire le bon entretien qui apporte la fiabilité des équipements plus élevés avec moindre de risques. Une maintenance efficiente est en train de faire de la maintenance qui assure la fiabilité des équipements et la réduction des risques avec moins de ressources et de temps (Weber and Thomas, 2005).

Les indicateurs de performance de maintenance que notre système multi-agents affiche sous forme d'un Tableau de Bord sont définis dans le Tableau VI.10:

TABLEAU VI. 10. LES INDICATEURS DE PERFORMANCE DE MAINTENANCE.

Indicateur	Définition	Calcul de l'indicateur	Interpretation et Utilisation
MTBF	Mean Time Functioning	$\frac{\Sigma \text{UpTime}}{\text{Nbr failures}}$	Pour mesurer le temps de bon fonctionnement. Elle caractérise la fiabilité d'une entité.
MTTR	Mean Time To Repair	$\frac{\Sigma \text{Repair Time}}{\text{Nbr failures}}$	Pour mesurer le niveau de difficulté et de réparation d'un équipement défectueux.
Availability	Exprime la disponibilité soit lié à la machine ou la disponibilité des opérateurs.	$\frac{\text{UpTime}}{\text{UpTime} + \text{Down Time}}$	Possibilité d'une entité à être en mesure d'accomplir une fonction requise dans des conditions données à un moment donné.
λ	Taux de défaillance	$\frac{\text{Nbr faiures}}{\text{Use Duration}}$	Un indicateur de la fiabilité. Il caractérise la vitesse de variation de la fiabilité au cours de temps.
Utilization Rate	Le volume de travail total alloué à chaque ressource.	$\frac{\text{Operational time}}{\text{Opening time}}$	Pour contrôler la planification et de veiller à la disponibilité des ressources.
Occupancy Rate	Le ratio des unités locatives (Units Rented) loués par rapport au nombre total	$\frac{\text{Units Rented Out}}{\text{Total units}}$	Le pourcentage de toutes les unités locatives occupé à un moment donné.

Outre que l'analyse des risques, le simulateur calcule également un ensemble d'indicateurs de performance liés à la maintenance qui sont présentés dans le tableau VI.10. La figure VI.16 affiche ces indicateurs qui assurent la sûreté de fonctionnement de l'équipement : la Fiabilité caractérisée par la MTBF (Temps Moyen de Bon Fonctionnement), la Maintenabilité caractérisé par la MTTR (Temps Moyen de Réparation), la Disponibilité et le Taux de défaillance.

D'autres indicateurs calculés par le simulateur AnyLogic concernant les ressources humaines (les opérateurs). Le simulateur calcule : la Disponibilité des Opérateurs, le Taux d'Occupation et le Taux d'Utilisation. Ces indicateurs permettent de garantir une disponibilité et une optimisation de ces ressources.

L'objectif est d'obtenir un Tableau de Bord contenant ces indicateurs pour le suivi de comportement instantané des équipements et pour avoir une visibilité sur la situation actuelle afin d'éviter d'assurer au maximum le fonctionnement du système.

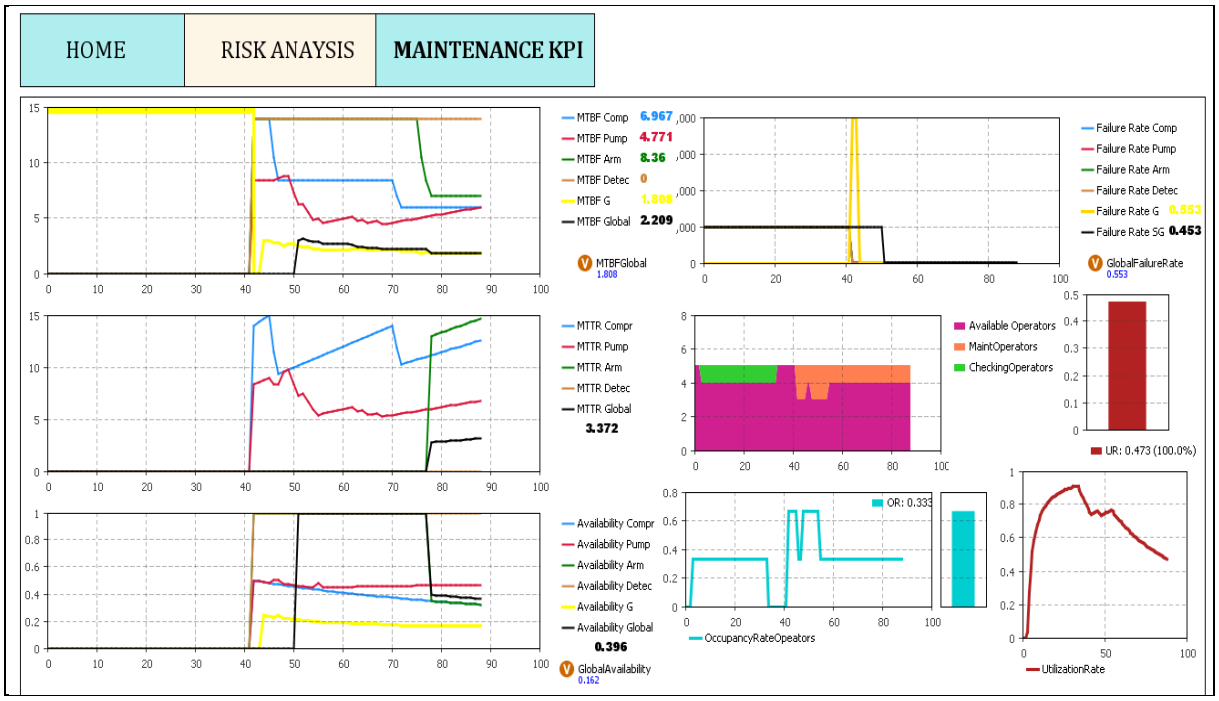


Figure VI. 16. Les KPIs résultant de la simulation.

Pour le calcul des indicateurs de performance (MTBF, MTTR, Taux de défaillance et Disponibilité) de système global (installation technique), nous avons supposé deux hypothèses :

Hypothèse 1: On calcule les indicateurs de l'installation technique qui rassemble tous les équipements (le système global), ces indicateurs sont présentés dans les courbes de la figure VI.16 (courbes en **noir)**. Le calcul ne sera commencé que lorsqu'un équipement tombe en panne (état = correctif), vue que le système ne sera influencé que si un équipement se trouve dans cet état;

Hypothèse 2: On considère que les équipements sont supposés en série et donc le système est en série et suit une loi exponentielle (λ = Cte)

Donc: $\lambda g = \sum \lambda i$ ➔ $MTBFg = \frac{1}{\lambda g}$,

Et: AvailabilityGlobal = Π Disponibilité des équipements (Car les équipements sont indépendants les uns des autres).

La 2ème hypothèse est illustrée dans les courbes (Figure VI.16) par la couleur **jaune**.

Si par exemple la pompe subit une défaillance et la pompe est toujours en marche donc les valeurs de KPI ne changement pas. Une fois elle subit plus qu'une défaillance et change d'état vers un état dégradé (nécessite une prévention), les valeurs de KPI commencent aussi à changer (Fig. VI.17).

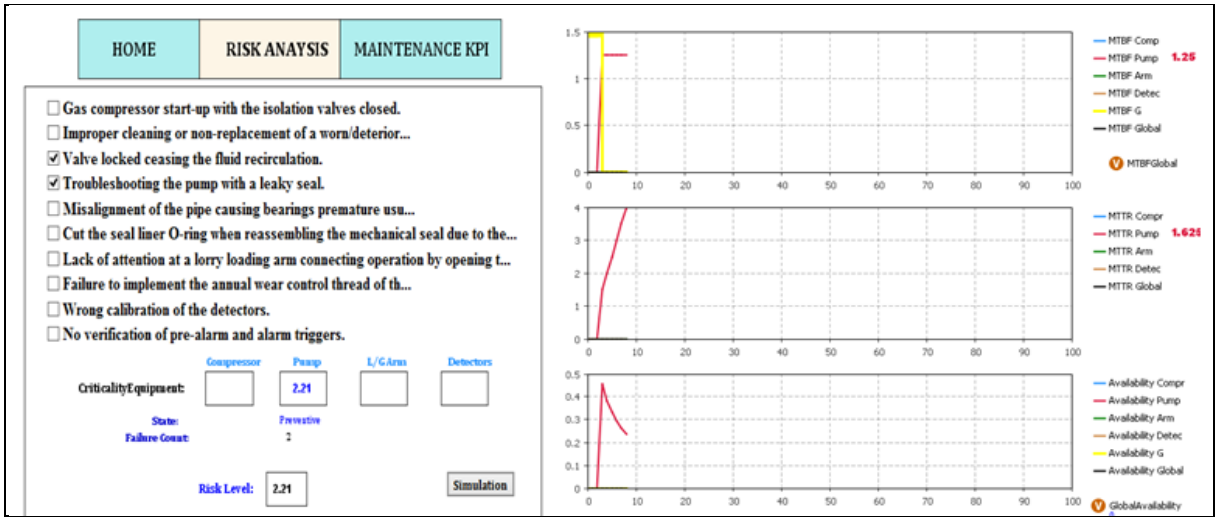


Figure VI. 17. Variations des KPIs de la pompe après défaillance.

Si deux équipements (par exemple la pompe et le compresseur) subissent des défaillances au même temps et en augmentant le nombre de défaillances de la pompe, on constate que la MTBF commence à diminuer (fig. VI.18).

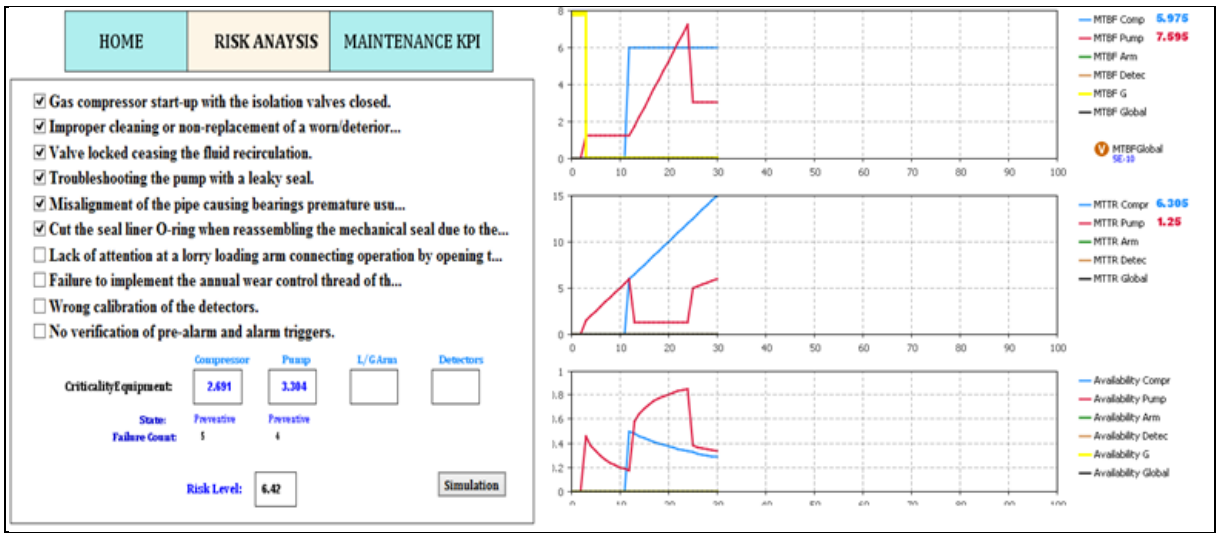


Figure VI. 18. Variations des KPIs de deux équipements (pompe et compresseur).

Lorsque tous les équipements subissent des défaillances (fig. VI.19), cela commence à influencer sur le système global et les valeurs de KPI varient. On constate que la simulation calcule le MTBF global selon la 2ème hypothèse (λ = Cte), alors qu'elle ne va commencer le calcul des KPIs du système global (selon Hypothèse 1) que si un équipement tombe en panne.

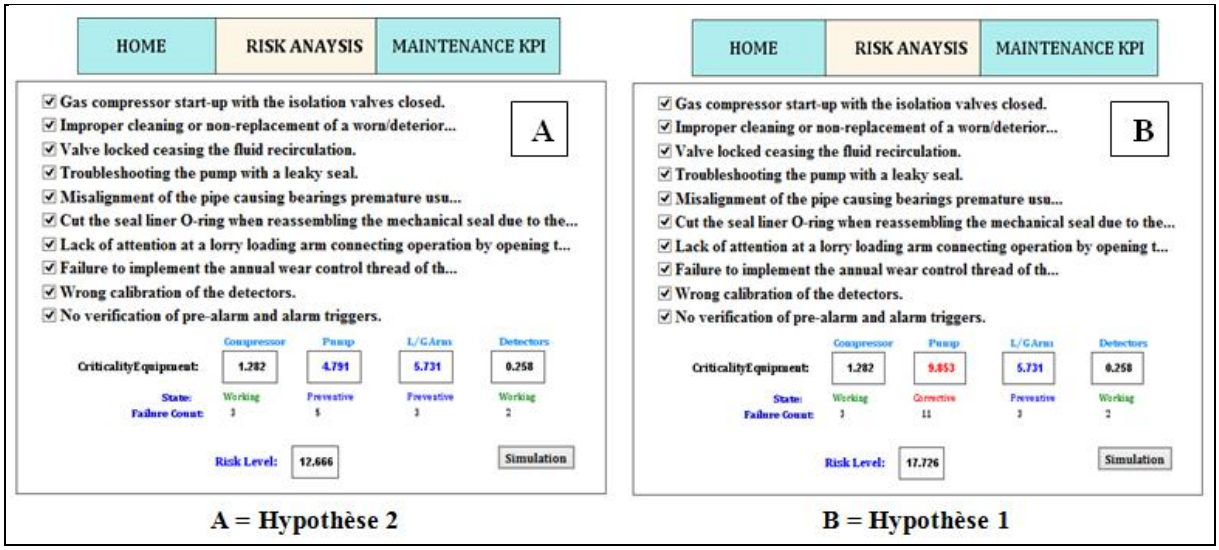


Figure VI. 19. Simulation des défaillances que subit chaque équipement.

Les figures (VI.20 et VI.21) présentent la variation de la MTBF des équipements avec le temps. D'après les courbes, on remarque que la MTBF de la pompe commence à diminuer. Puisque la pompe est tombée en panne (B), la MTBF (courbe en noir) commence à se calculer, alors que selon l'hypothèse 2 (A), nous remarquons la diminution de la MTBF globale ➔ si un équipement tombe en panne cela va influencer sur la MTBF globale de système.

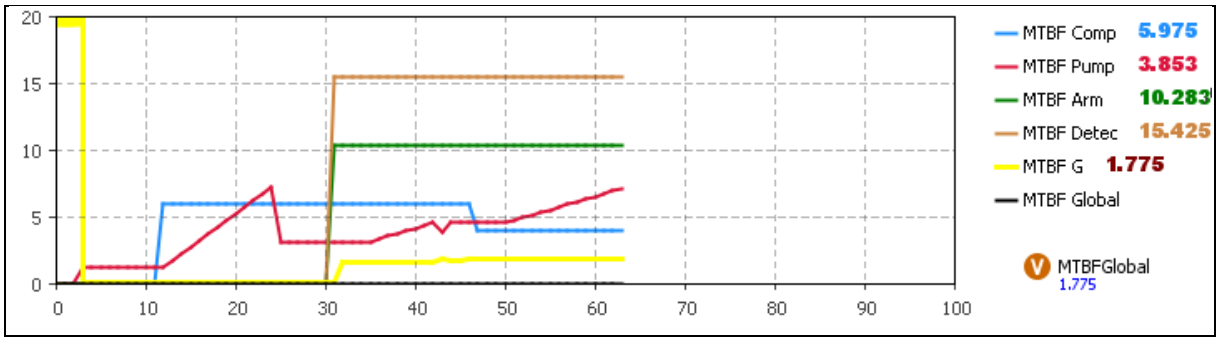


Figure VI. 20. Simulation de la MTBF des équipements (A).

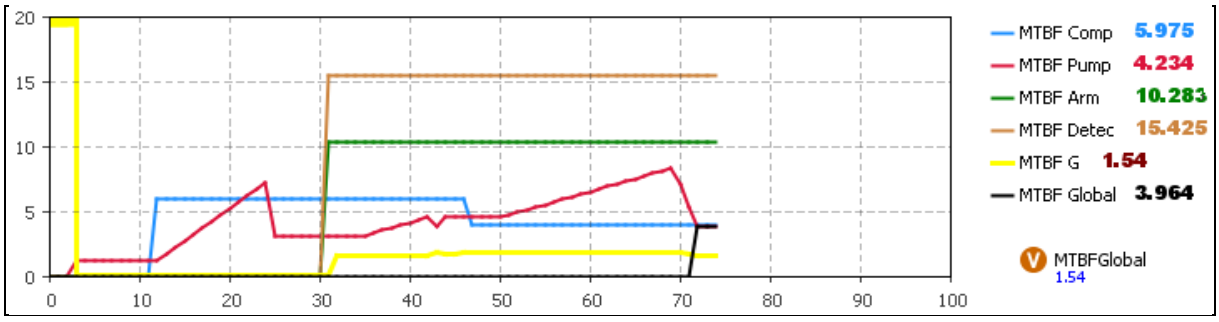


Figure VI. 21. Simulation de la MTBF des équipements (selon B).

Les figures (VI.22 et VI.23) présentent la variation de la disponibilité des équipements avec le temps. D'après les courbes, nous remarquons que la disponibilité de la pompe commence à diminuer à partir de l'instant t = 70. Puisque la pompe est tombée en panne, la disponibilité (courbe en noir) commence à se calculer pour le système global, alors que selon l'hypothèse 2 (A), il s'agit de la diminution de la disponibilité globale du système ➔ si un équipement tombe en panne cela va influencer sur la disponibilité globale de système.

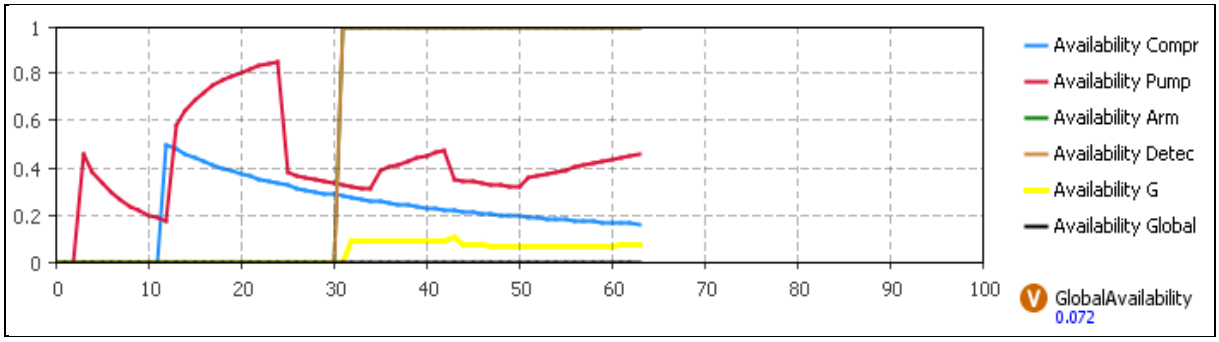


Figure VI. 22.Simulation de la disponibilité des équipements (A).

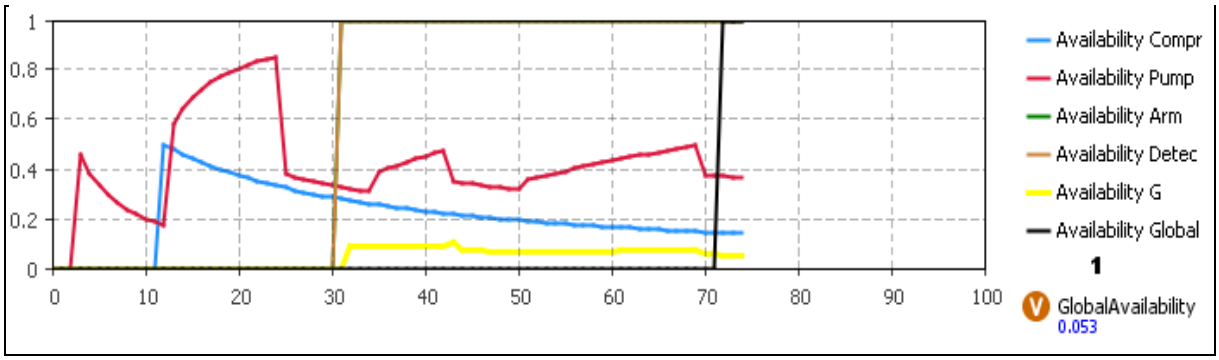


Figure VI. 23.Simulation de la disponibilité des équipements (B).

Pour le taux de défaillance global du système, il commence à augmenter si le taux de défaillance de chaque équipement augmente.

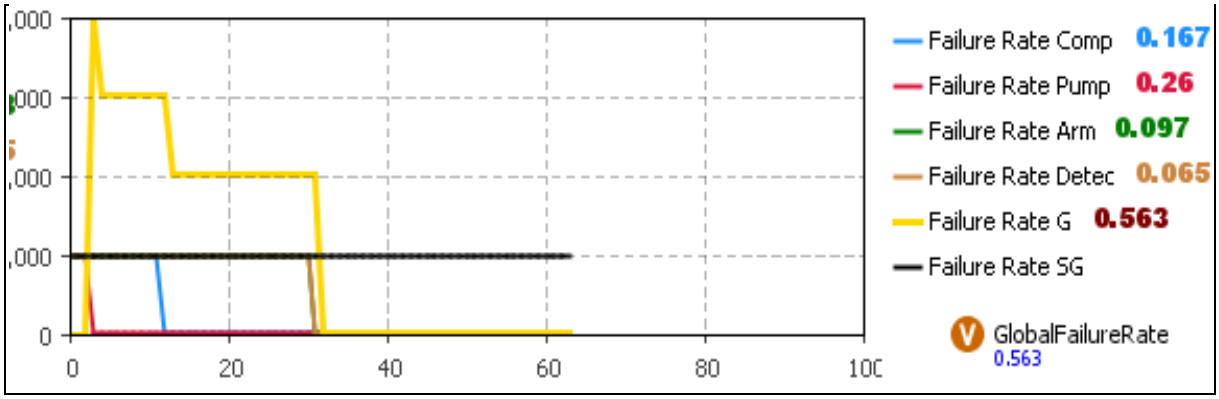


Figure VI. 24.Simulation de taux de défaillance des équipements (A).

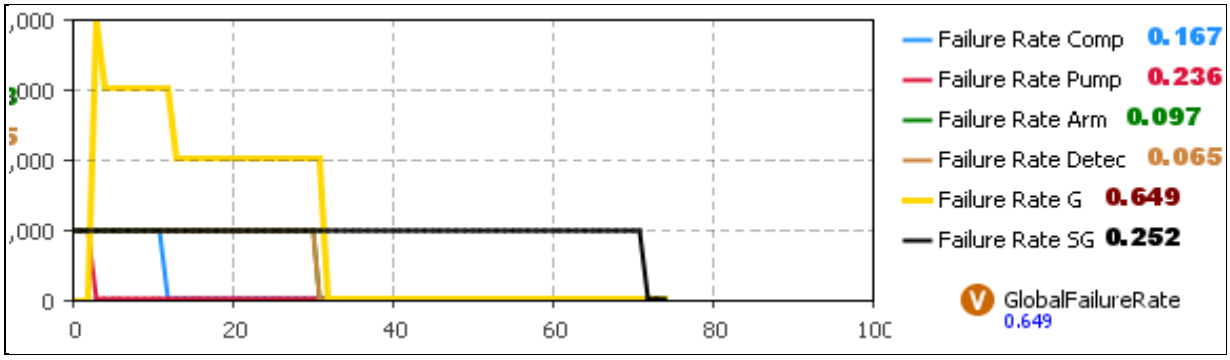


Figure VI. 25.Simulation de taux de défaillance des équipements (B).

Ces résultats montrent qu'après un nombre important de défaillances de chaque équipement, les indicateurs du système global se dégradent. En dépassant le seuil de criticité, le système se trouve dans un état d'arrêt total, ce qui montre une forte liaison entre les défaillances que subissent le système et les indicateurs de performance de maintenance.

3. DISCUSSION DES RÉSULTATS

3.1. L'apport du modèle MOSAR-UML

La littérature fait état de plusieurs travaux qui proposent des méthodologies pour l'analyse des risques. Par exemple, dans (Mazouni *et al.*, 2008), les auteurs proposent une approche générique d'analyse des risques appropriable par tout acteur d'un projet industriel qui permet d'emboiter les différentes analyses de ces acteurs pour construire le dossier global d'analyse des risques du système en proposant un outil logiciel support de la méthode. Cet outil informatique permet de rassembler les données telles que les entités sources et cibles de danger, des espaces de danger et des espaces de vulnérabilité, des états des entités et des événements provoquant les changements d'états et ce à base d'une méthode nommée "*Management Préliminaire des Risques (MPR)*" qui est une démarche de résolution des problèmes en matière de management des risques. L'outil informatique présenté par les auteurs est SIGAR (Système Informatique Générique d'Analyse de Risque). Il s'agit d'un outil générique dédié à la méthode MPR conçu sur une base de données SIAD (système Informatisé d'Aide à la Décision) et il est doté d'une interface graphique. Son objectif principal est d'assister les évaluateurs dans la rédaction, la vérification et la mise à jour des dossiers de management des risques et entre autres les analyses (Préliminaire) de Risque. Il permet aussi à l'opérateur de générer automatiquement des documents de management des risques, des statistiques ou des diagrammes, et de préserver une meilleure traçabilité et ce à partir des données saisies au préalable qui se trouvent dans des fichiers textes ou sur des supports papiers ordinaires (Mazouni *et al.*, 2008). Le principal intérêt de SIGAR est de garantir la traçabilité au sein du processus global de management des risques, mais il ne permet pas la prise de décisions et ne prend pas en compte l'aspect complexe de la tâche de maintenance.

Gabriela Medina-Oliva (2011) a développé une méthodologie permettant l'évaluation des stratégies de maintenance afin de satisfaire les exigences requises du système de maintenance

avec ses systèmes contributeurs en se basant sur le calcul d'un ensemble d'indicateurs. Cette méthodologie a intégré des aspects de modélisation orientée objet au formalisme classique des réseaux bayésiens afin d'obtenir l'outil Bayesialab. Cette méthodologie est à base de PRM (Probabilistic Relational Model) supporté par le langage de modélisation "Skool" qui permet de supporter toute modélisation nécessaire à l'évaluation des stratégies de maintenance.
Elle intègre également les différentes interactions du système de maintenance avec ses systèmes contributeurs, l'impact de différentes stratégies de maintenance (par exemple l'organisation de la maintenance, le plan de maintenance, etc..) sur le calcul des indicateurs et l'intégration de connaissances de diverses natures du Système Principal et Système Maintenance. La méthodologie proposée par Medina-Oliva ne prend pas en compte la sécurité au cours des activités de maintenance.

L'approche générique de Management du risque présentée dans ISO 31000: 2009, "*Une approche générique de Management du risque*" fournit des directrices pour gérer toute forme de risque. Elle donne des orientations pour les programmes d'audit internes ou externes. Les organisations qui l'utilisent peuvent évaluer leurs pratiques en matière de management du risque au regard d'un référentiel reconnu au niveau international, qui offre des principes rigoureux pour un management. Cependant, cette norme ne fournit pas un modèle dynamique permettant de suivre le changement d'état du système.

Une autre méthode nommée MéDISIS développée dans les travaux de Idasiak and Kratz (2010), présente une organisation de l'analyse de sûreté de Fonctionnement, la recherche des défaillances particulières des composants, et assurant l'évaluation du comportement dysfonctionnel du système global. Il s'agit d'une méthode déductive et incrémentale qui capitalise les résultats d'analyse au sein d'une Base de données des Comportements Dysfonctionnels et exploite les modèles SysML. Ces modèles permettent à partir des règles d'analyse de dégager les données nécessaires pour établir une AMDEC. La BCD (une Base de données des Comportements Dysfonctionnels) exploite le langage SysML et supporte la méthode MéDISIS en permettant d'adjoindre la partie dysfonctionnelle du système et de modéliser toutes ses dimensions. Nous concluons donc que la méthode proposée par Idasiak et Kratz permet de créer une AMDEC à partir du langage SysML exploité par une Base de données. Cette base de données permet d'adjoindre la partie dysfonctionnelle du système identifiée au cours de l'AMDEC et qui sert comme un support de MéDISIS. La limite que présente cette méthode réside dans le fait que le langage SysML n'est pas utilisé dans cette méthode pour la création d'une Base de Données propre à ses finalités, et ne prend pas en considération les risques pouvant survenir.

Similaire à cette méthode, on trouve le logiciel ENVISION qui est un outil d'Analyse Fonctionnelle Générale et de la Valeur utilisant la méthode MISME "*Méthode d'Inventaire Systématique des Milieux Extérieurs*" (Norme NF X50-151-153). Cette méthode couvre une Analyse des Modes de Défaillances, une analyse fonctionnelle externe et interne, une analyse des coûts et de la valeur, etc. Ce logiciel permet de produire des cahiers des charges, d'avoir une analyse fonctionnelle du besoin, d'analyser les modes de défaillances, d'avoir une traçabilité de couverture, etc. Ce logiciel centralise les données dans un SGBD (Système de

Gestion des Bases de Données) dans un référentiel unique et les affiche aux formats Word, Excel ou Tableaux de bord, mais il ne permet pas une détection des dangers pouvant survenir lors de la réalisation d'une activité industrielle ni une prise de décision.

Dans Fallet-Fidry (2012), l'auteur développe une approche d'analyse de risques multidisciplinaire nommée l'Analyse intégrée des Risques (AiDR). Cette approche a pour but d'analyser les risques des installations de type unités de production d'énergie, qui peuvent être considérées comme des systèmes sociotechniques complexes. L'AiDR permet l'intégration des risques techniques, humains, organisationnels, et environnementaux au sein d'un même modèle de risques fondé sur une approche par réseaux Bayésiens. Elle s'appuie à la fois sur des approches similaires comme l'approche SAM (Paté-Cornell and Murphy, 1996), l'approche ARAMIS (Andersen *et al.*, 2004) et l'approche MIRIAM-ATHOS (Plot, 2004).

Cette approche traite des problèmes théoriques et pratiques tels que la représentation de la complexité des systèmes, la quantification des paramètres du modèle de risques, la modélisation, la propagation, l'analyse de certains risques et les incertitudes associées. Toutefois, elle a mis en évidence certaines limites : la quantification du modèle de risques n'est pas triviale pour une personne non experte dans le domaine, les quantifications sont sous forme de nombre flous sur les variables d'intérêt.

Le modèle que nous proposons dans ce travail de recherche a permis de pallier l'ensemble de ces limites.

En effet, l'utilisation du langage UML et de la méthode MOSAR semble être les outils adéquats pour définir les scénarios des risques, pour mesurer leurs criticités et pour les traiter sur une base hiérarchique selon plusieurs facteurs de risque (humain, technique, organisation et environnement).

L'utilisation d'UML a l'avantage de formaliser un système avec un langage standard ouvert, un graphique flexible pour permettre l'évolution de l'architecture du modèle. La méthode MOSAR permet le déploiement des systèmes complexes et l'évaluation des dommages potentiels dans des cibles spécifiques. En outre, elle permet l'identification et modélise le mécanisme du risque entre les sources de risque et les cibles.

La combinaison du langage UML et de la méthode MOSAR a été employée avec succès pour identifier et modéliser le mécanisme du risque entre les sources de risque et les cibles dans l'activité de maintenance. La méthodologie MOSAR-UML laisse comprendre la complexité d'une situation de maintenance.

Cette méthodologie manifeste plusieurs intérêts. Elle représente un moyen de soutenir l'analyse des risques avec une méthode systémique tenant compte des interactions entre les composants de système. Elle fournit un outil puissant pour la communication et la compréhension de la situation de maintenance qui laisse formaliser sa complexité afin de contrôler les risques. En outre, la méthodologie MOSAR-UML permet d'obtenir une base de données, qui est employée pour enregistrer les données et calcule automatiquement la criticité. Les données enregistrées dans cette base de données seront utilisées comme un

système d'information pour l'apprentissage issu de l'analyse des accidents et pour la simulation par les Systèmes multi-Agents.

3.2. L'apport de la simulation multi-agents sur la plateforme AnyLogic

Dans le domaine de maintenance, les Systèmes Multi-Agents traitent spécifiquement les problèmes d'ordonnancement des ressources et de planification de production. Dans (Aissani *et al.,* 2009), les auteurs présentent le modèle multi-agents pour l'ordonnancement dynamique des tâches de maintenance pour un système de production de l'industrie pétrolière. Dans ce modèle, les agents assurent simultanément le calendrier d'entretien efficace et l'amélioration continue de la qualité de la solution par le biais de l'apprentissage par renforcement, à l'aide de l'algorithme SARSA. Le modèle a été mis en œuvre sur la plateforme JBuilder afin de générer des solutions en ligne pour planifier les tâches de maintenance prédictive et corrective en ligne et d'améliorer leur qualité en minimisant la variation de flux sortant des réservoirs de la raffinerie de pétrole.

Le travail développé par (Zhou *et al.*, 2004), consiste à proposer un SMA pour résoudre le problème de la planification de la maintenance des bus, qui est distribué et dynamique dans la nature, a reçu moins d'attention par rapport à des problèmes d'ordonnancement dans le secteur manufacturier. Le SMA de planification de la maintenance de bus a été construit sur la plateforme ZEUS qui démontre la dynamique des environnements techniques distribués et comment générer des plannings pour un ensemble de commandes dans les temps de calcul raisonnable, tout en maintenant un certain niveau d'optimalité.

Dans (Sabar *et al.,* 2008), les auteurs ont présenté une approche à base d'agents pour la planification et l'ordonnancement en temps réel des ressources humaines opérationnelles dans un contexte de chaîne d'assemblage flexible. Ils ont utilisé la plateforme AnyLogic pour développer une simulation de la ligne d'assemblage basé sur l'utilisation de plusieurs types d'agents intelligents qui encapsulent les processus de prise de décision d'ordonnancement du personnel et d'autres part les entités physiques dans la chaîne.

(Kizim *et al.,* 2013) appliquent les SMA pour une analyse des problèmes et la mise en évidence des tâches impliquées dans l'organisation de la maintenance et la réparation du matériel dans les secteurs routiers effectués et fournit une aide à la décision dans la gestion de la maintenance et la réparation des routes et des véhicules.

Alors que (Talib *et al.,* 2010) ont décrit un système pour gérer l'information et des connaissances générées pendant le processus de maintenance logicielle afin de faciliter le partage des connaissances entre les responsables de l'organisation de l'apprentissage. Le modèle est conçu en utilisant Prometheus Design Tool (PDT) pour soutenir le partage facile des connaissances, l'envoi et la réception du courrier, le cryptage et le décryptage de fichiers, et le transfert de fichiers calendriers. Il est une méthodologie conceptuelle qui met fortement l'accent sur le développement rapide d'un système, mais ne permet pas aux utilisateurs de résoudre leur problème ou de prendre une décision.

Dans (Gao *et al.*, 2009), les auteurs présentent un système intelligent basé sur un agent à l'appui de l'interopérabilité des données et des services pour faciliter l'intégration de l'information, de coordonner l'exécution de la fabrication, et pour aider les ingénieurs à prendre des décisions à base des informations qui sont à jour et ce dans le processus chimique industriel. L'implémentation de leur système était sur la plateforme JADE. Il est utilisé pour établir le système multi-agents pour l'intégration de l'information et l'aide à la décision dans l'industrie des procédés chimiques, et de fournir un environnement d'accès et de surveillance de ce système. Le but de cette simulation est d'identifier les stratégies opérationnelles de maintenance appropriées qui assurent la faisabilité opérationnelle à un coût minimum en identifiant le meilleur plan d'investissement pour le système utilitaire de site.

Les recherches existantes utilisant la modélisation par les systèmes multi-agents dans la maintenance et la réparation des équipements tels que (Panteleev *et al.*, 2014) ont théoriquement abouti par leur modèle développé à déterminer le montant des techniciens de gestion d'emploi de la société de services. Alors que le travail accompli par (Kaegi *et al.*, 2009) a suivi la disponibilité du parc machine en fonction des stratégies de maintenance définies; cependant, il ne prend pas en compte les ressources nécessaires pour assurer cette disponibilité. Bouzidi-Hassini et Kaplanoglu présentent dans leurs travaux (Kaplanoglu, 2014; Bouzidi-Hassani *et al.*, 2015) un état de l'art des recherches existantes appliquant des systèmes multi-agents pour résoudre des problèmes de maintenance.

En somme, les travaux de recherche qui utilisent les systèmes multi-agents dans le domaine de maintenance traitent spécifiquement les problèmes d'ordonnancement des ressources et de planification de production. Ils ne prennent pas en compte les risques et les accidents dans les activités de maintenance et ne proposent pas un outil d'aide à la décision pour la maîtrise de ces risques.

D'autre part, les systèmes multi-agents sont rarement utilisés dans l'analyse des risques et dans le domaine de la sécurité. Cependant, les chercheurs ont réalisé récemment l'importance des SMA dans ce domaine (Kaegi *et al.*, 2009). L'une des rares études dans ce domaine est exposée par Boudiaf et al. (Boudiaf *et al.*, 2015). Les auteurs ont présenté un modèle conceptuel qui décrit un système de sécurité pour le processus technologique et son application a été sur un moteur à aimant permanent DC. Ce modèle conceptuel permet d'identifier les risques et la surveillance du déclenchement d'alarme pour protéger les équipements en fonction d'un seuil prédéfini. Néanmoins, il ne se concentre pas sur les risques dans les activités de maintenance ou la criticité des défaillances de l'équipement.

Les travaux de Zhayang *et al.*, (2011) présentent une méthodologie pour l'inspection fondée sur le risque en utilisant le logiciel RISKWISE pour évaluer la stratégie de la maintenance dans le processus industriel qui a été construit dans l'unité ISOMAX de raffinerie de pétrole Fujian. Le but de cette méthodologie est d'établir une matrice des risques permettant d'identifier les risques, d'estimer leur probabilité d'occurrence avec leur impact, et de classer ces risques en fonction de ces informations. Cette matrice fournit également une capacité à documenter la façon dont ces risques seront abordés (plans d'action) et le suivi de cette action

sur les risques associés. Cette méthode ne permet pas d'avoir un modèle dynamique, qui montre l'aspect complexe du système.

Alexander *et al.,* (2013) développent une technique d'analyse des risques (SimHAZAN) qui utilise la modélisation et la simulation multi-agents pour explorer les risques au sein d'un Système de Système (SoS) pour éviter les problèmes liés à un accident spécifiques avec les outils existants. Cette technique ne comprend pas les interventions de maintenance avec ses scénarios de défaillance pouvant survenir.

Il s'est avéré après une étude de la revue de la littérature qu'il ya un manque des travaux qui traitent les risques des activités de maintenance et en particulier dans la chaîne logistique GPL. La complexité de ces systèmes nécessite la modélisation et la simulation par les systèmes multi-agents pour mieux comprendre et traiter cette complexité.

Le modèle proposé permet d'apporter des éléments de réflexion pour maîtriser les risques dans les activités de maintenance en utilisant les SMA. Le but est de modéliser et de simuler des scénarios de défaillance de maintenance (défaut, manque, retard, ou insuffisance de maintenance) de la chaîne logistique de GPL, et voir l'impact de ces défaillances sur les opérations de la maintenance et sur toute la chaîne logistique. En outre, le modèle proposé permet de gérer la complexité des activités de maintenance afin d'optimiser les ressources utilisées dans les tâches de maintenance pour garantir à la fois l'optimisation des ressources et la disponibilité des machines. Il fournit des connaissances sur les différentes interactions entre les éléments qui constituent ce système afin d'obtenir des résultats instantanés. Ces résultats instantanés s'affichent sous forme d'un Tableau de Bord que rassemblent un ensemble des indicateurs de performance liés à la maintenance à savoir la fiabilité, la disponibilité, la maintenabilité, le taux d'utilisation, le taux d'occupation…

Les résultats de la simulation donnent également un aperçu sur la performance du parc machine avec le juste nécessaire de ressources à chaque instant, chose non évidente avec des modèles analytiques qui n'explique pas le temps d'émergence, c'est-à-dire qu'ils ne prennent pas en considération le temps et ils ne permettent pas une représentation du comportement de système.

Le modèle proposé manifeste plusieurs intérêts. Il représente un moyen de soutenir l'analyse des risques avec une méthode systémique tenant compte des interactions entre les composants de système. Selon un point de vue théorique, il fournit des connaissances sur le domaine de la maintenance et le comportement des différents éléments qui constituent ce domaine afin d'obtenir des résultats instantanés. Ces résultats sont traités pour comparer et choisir la bonne stratégie, et d'afficher des indicateurs de performance, sans la nécessité de calculer ou de modifier les paramètres à chaque fois. Ce modèle est utilisé comme une aide à la décision en synthétisant des informations de différents scénarios. C'est un outil puissant pour la communication et la compréhension de la situation de maintenance laissant formaliser sa complexité pour contrôler et maîtriser les risques.

La simulation avec cette approche visuelle permet de gagner du temps par l'anticipation et le développement de la planification, l'analyse des risques, l'optimisation, et une meilleure

gestion des ressources humaines et matérielles. Par ailleurs, selon les points de vue pratiques, le travail actuel peut intéresser les parties prenantes afin de prendre les bonnes décisions concernant l'affectation et le recrutement des opérateurs (nombre suffisant pour mener à bien les activités de maintenance). C'est un outil qui pourrait guider les décideurs vers les meilleurs choix pour éviter des scénarios de défaillance de maintenance pouvant survenir.

4. CONCLUSION

Nous avons présenté dans ce chapitre l'application de la méthodologie proposée sur la chaîne logistique de GPL du site Relais-Vrac de l'entreprise PRIMAGAZ France. Nous avons présenté tout d'abord les trois tableaux que présentent l'identification et la modélisation du système, l'identification des dangers et les principaux scénarios d'accident, et la quantification des risques résultant du modèle MOSAR-UML. Ensuite, nous avons simulé les scénarios de défaillance de maintenance choisis pour analyser les risques pouvant survenir sur les équipements (compresseur, pompe, bras gaz/liquide et détecteurs) en calculant leurs criticités, et nous avons par la suite calculé les différents indicateurs de performance de maintenance. Nous avons calculé les indicateurs de performance du système global selon deux hypothèses : la première en considèrant le système en série et la deuxième en prenant l'agent « *installation Technique* » comme étant le système global. Finalement, nous avons fait une comparaison de la méthodologie proposée avec les travaux existants en mettant en évidence les atouts que présente cette méthodologie.

BIBLIOGRAPHIE

Aissani, N., Beldjilali, B., Trentesaux, D., 2009. Dynamic scheduling of maintenance tasks in the petroleum industry: A reinforcement approach. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 22, 1089-1103.

Alexander, R., Kelly, T. 2013. Supporting systems of systems hazard analysis using multi-agent simulation. *Safety Science*, 51, pp. 302-318.

Andersen, H., Casal, J., Dandrieux, A., Debray, B., Dianous, V.D., Duijm, N.J., Delvosalle, C., Fievez, C., Goossens, L., Gowland, R.T., Hale, A.J., Hourtolou, D., Mazzarotta, B., Pipart, A., Planas, E., Prats, F., Salvi, O., Tixier, J., 2004. Aramis user guide, 2004.

Boudiaf, B., Zebirate, S., Aissani, N., Chaker, A., 2015. A Multi-agent Based Platform for Safety Control. Service Orientation in Holonic and Multi-Agent Manufacturing. Springer International Publishing Switzerland 2015, Studies in Computational Intelligence 594, pp.135-143.

Bouzidi-Hassini, S., Benbouzid-Si Tayeb, F., Marimier, F., Rabahi, M., 2015. Considering human resource constraints for real joint production and maintenance schedules. *Computers & Industrial Engineering*, Vol 90, pp. 197-211.

Fallet-Fridry, G., 2012. Contribution à la modélisation et au traitement de l'incertain dans les analyses de risqué multidisciplinaires de système industriels- Application à la Source Froide d'une unité de production d'énergie. Other. Université de Lorraine. French. < tel-00781498>.

Gao, Y., Shang, Z., Kokossis, A., 2009. Agent-Based intelligent system development for decision support in chemical process industry. *Expert Systems with Applications*, Volume 36, Issue 8, October 2009, p. 11099-11107.

Gallab, M., Bouloiz, H., Tkiouat, M., Garbolino, E., ElKilni, M.A., 2016a. Simulation of Failure Scenarios related to Maintenance Activities. International Journal of Applied Engineering Research, Vol: 11, N°24, 2016, pp. 11935-11949.

Gallab, M., Bouloiz, H., Chater, Y., Tkiouat, M., 2016b. Towards a Simulation Model to Ensure the Availability of Machines in Maintenance Activities. International Journal of Computer, Electrical, Control and Information Engineering, Vol. 10, N°7, 2016, pp. 1213- 1217.

Garbolino, E., 2008. La défense en profondeur; contribution de la sûreté nucléaire à la sécurité industrielle. Edition LAvoisier, ISBN: 978-2-7430-1030-0,pp. 66.

Idasiak, V., Kratz, F., David, P., 2010. MéDISIS, integrating dependability analysis to Model Based System Engeneering Processes. 17eme Congrès de Maîtrise des Risques et de Sûreté de Fonctionnement. 5-7 octobre 2010, La Rochelle.

Kaegi, M., Mock, R., Kroger, W., 2009. Analyzing maintenance strategies by agent-based simulations: A feasibility study. *Reliability Engineering and System Safety*, Vol 94, Issue 9, pp. 1416-1421.

Kaplanoglu, V., 2014. Multi-agent based approach for single machine scheduling with sequence-dependent setup times and machine maintenance. Applied Soft Computing, Vol 23, pp. 165-179.

Kizim, A.V., Denisov, M.V., Kamaev, V.A., 2013. Organization of the repair and maintenance in road sector with ontologies and multi-agent systems. Procedia Technology, Volume 9, Pages 819-825.

Le, N., De Dianous, V., 2008. Evaluation des dispositifs de prévention et de protection utilisés pour réduire les risques d'accidents majeurs, Ω10, Rapport d'étude n°DRA-08-95403-01561B, 01/09/2008 : INERIS pour le Ministère chargé de l'environnement, rapport disponible sur www.ineris.fr.

Mazouni, M.H., 2008. For a Better Approach to Risk Management: From the Ontological Modelling of Accidental Process in Interactive System Decision Support, Thesis PhD from the Institute National Polytechnic de Lorraine Specialty: Automatic, Signal Processing and Computer Engineering, November 2008, pp. 39-42.

Medina Oliva, G., 2011. Modélisation conjointe des connaissances muli-points de vue d'un système industriel et de son système de soutien pour l'évaluation des stratégies de maintenance. Automatic. Université Henri Poincaré- Nancy I, 2011. French. <tel-00702247>.

Panteleev, V.V., Kamaev, V.A., Kizim, A.V., 2014. Developing a Model of Equipment Maintenance and Repair Process at Service Repair Company Using Agent-Based Approach. Procedia Technology, Vol 16, pp. 1072-1079.

Paté-Cornell, E., Murphy, D.M., 1996. Human and management factors in probabilistic risk analysis: the SAM approach and observations from recent applications. *Reliability Engineering and System Safety*. Elsevier Science Ltd.p. 115-126.

Plot, E., 2004. Guide de la prise en compte du facteur humain dans l'évaluation des systèmes de gestion des risques majeurs. European Safety and Reliability conference, Stavanger, Norvège.

Sabar, M., 2008. Une approche à base d'agent pour la planification et l'ordonnancement en temps réel de personnel dans un contexte de chaîne d'assemblage flexible. Université Laval, Faculté des sciences de l'administration, Québec, Canada.

Talib, A. M., Rusli, A., Rodziah, A., Masrah Azrifah, A.M., 2010. MASK-SM: Multi-Agent Based Knowledge Management System to Support Knowledge Sharing of Software Maintenance. Computer and Information Science, Volume 3, N° 2, May 2010, pp. 52-78.

Vallee, A., Dolladille, O., 2003. Analyse des risques et prévention des accidents majeurs (DRA-34) . Rapport Partiel n°DRA-2003-Ava/ODo-46054-64web.doc: INERIS pour le Ministre de l'Ecologie et du Développement Durable.

Weber, A., Thomas, I. R., 2005. Key Performance Indicators. Measuring and Managing the Maintenance Function, Ivara Corporation, Burlington Ontario, Canada.

Wireman, T., 1998. Developing Performance Indicators for Managing Maintenance. New York, Industrial Press, Inc.

Zhaoyang, T., Jinfeng, L., Zongzhi, W., Zheng, J., Weifeng, H., 2011. An evaluation of maintenance strategy using based inspection. *Safety Science*, 49, pp. 852-860.

Zhou, R., Fox, B., Lee, H.P., Nee, A.Y.C., 2004. Bus maintenance scheduling using multi-agent systems. *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 17, 623–630.

CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES

L'ambition de ce travail de recherche est de proposer une méthodologie issue de l'approche systémique qui tient compte la complexité des tâches de maintenance. L'objectif est de maîtriser les risques pouvant survenir lors de la réalisation de ces tâches particulièrement dans la chaîne logistique de GPL.

La première contribution de ce travail est la proposition d'un modèle d'analyse des risques qui prend en compte le caractère complexe des travaux de maintenance et les interactions entre ses composants (humains, techniques, organisationnels et environnementales). Ce modèle conceptuel nous a permis d'identifier et modéliser le système étudié, d'identifier les principaux scénarios de risques, de quantifier les risques en mesurant leurs criticités, de les classifier selon des facteurs de risque (humain, technique, organisation et environnement) et de présenter des mesures de sécurité. Ce modèle est basé sur la combinaison de deux outils systémiques qui sont le langage UML et la méthode MOSAR. Le modèle proposé MOSAR-UML nous a permis également de créer une base de données à l'aide du langage SQL pour enregistrer les données et calculer automatiquement la criticité de chaque scénario à partir des trois paramètres (gravité, fréquence, détectabilité). L'objectif est de construire un système d'information pour l'apprentissage des accidents. Cette base de données est exploitée dans la simulation par les SMA pour explorer la complexité du système étudié et simuler des situations à risque.

Nous nous sommes intéressés au SMA qui s'avère l'outil adéquat pour répondre à la problématique. Nous avons présenté une architecture générale d'un SMA permettant la maîtrise des risques des activités de maintenance, ainsi que l'optimisation de ressources (humaines et techniques) pour la réalisation d'une intervention de maintenance avec le juste nécessaire des ressources. Après, nous avons développé un simulateur à base d'agent sur la plateforme AnyLogic, qui a pour objectif de simuler les scénarios de défaillance de maintenance particulièrement celle de la chaîne logistique de GPL, et de voir l'impact de ces défaillances sur les opérations de maintenance et sur toute la chaîne globale. En outre, le simulateur développé permet le calcul de la criticité pour chaque équipement et celle du système global (Système Technique) afin d'obtenir un niveau de risque. Ce niveau de risque permettra aux décideurs d'avoir une idée sur le seuil qui peut amener à un arrêt du système. Il permet également de visualiser un Tableau de Bord contenant un ensemble d'indicateurs de performance de maintenance permettant une meilleure visualisation. Ces indicateurs sont: la fiabilité, la maintenabilité, la disponibilité, le taux de défaillance, le taux d'utilisation, le taux d'occupation et la disponibilité des opérateurs. Ce modèle sert comme un outil d'aide à la décision qui synthétise les informations de différents scénarios permettant de comparer et de choisir la bonne stratégie à l'aide des indicateurs de performance. Il pourrait guider les décideurs industriels vers les meilleurs choix pour éviter des situations à risque pouvant se produire lors des interventions de maintenance.

Enfin, nous avons comparé notre travail aux travaux existants afin de montrer l'apport de notre méthodologie.

Notre travail de recherche, façonné par la modélisation et l'ingénierie, vise à formaliser et à unifier des savoirs et des savoir-faire afin de permettre aux individus, aux organisations (et plus particulièrement aux systèmes industriels) de les orienter vers les meilleures décisions et d'accroître leurs capacités de résilience face à des événements perturbateurs dommageables, à des aléas liés à la non disponibilité des ressources et à la non fiabilité du facteur humain.

Les travaux proposés dans le cadre de cette thèse vont donc permettre de contribuer au développement socio-économique des organisations. En effet, nos travaux permettent de mettre aux services des décideurs des outils scientifiques pour analyser leurs problèmes et pour pouvoir orienter leurs choix dans la gestion de la sécurité industrielle. La performance sociologique réside dans la maîtrise des risques des équipements afin d'assurer la protection de la santé et la sécurité des opérateurs. La performance économique peut résider dans la réduction des coûts liés aux risques et aussi dans l'optimisation des ressources affectées dans les démarches de la gestion de la sécurité industrielle et la sécurité au travail.

Nos prochains travaux sont et seront consacrés à plusieurs pistes de recherche. Comme première piste d'amélioration, nous comptons élargir l'application du modèle sur toute la chaîne logistique de GPL. Au niveau de l'exploitation de la plateforme, nous allons simuler les barrières de sécurité et de vérifier leurs niveaux d'efficacité.

Une autre amélioration portera sur l'étude de la transmission des défaillances dans le modèle et la quantification des incertitudes liées aux facteurs humains et au niveau du risque. Il est avantageux d'introduire et de coupler la logique floue avec le simulateur que nous avons proposé pour mieux quantifier ces incertitudes qui peuvent survenir lors des interventions de maintenance. Dans cette perspective, le travail portera précisément sur l'étude de l'efficacité et l'incertitude des opérateurs dans la gestion des risques et sera fondé sur les travaux de Belhaj et Tkiouat (Belhaj and Tkiouat, 2014 ; 2015) qui ont appliqué la logique floue sur le management stratégique des ressources humaines.

De plus, il est judicieux d'utiliser le langage SysML dédié à l'ingénierie des systèmes complexes pour la modélisation au lieu du langage UML. La modélisation SysML permet de partager des spécifications d'un système complexe, d'identifier les risques et de créer une base d'analyse commune et de documenter et capitaliser le savoir.

Un autre aspect qu'il conviendrait d'aborder concerne les systèmes holoniques assimilant les agents à des holons afin que le système soit stable, ait une capacité d'autonomie et soit capable de coopérer. Ils sont efficaces pour la spécification d'une organisation multi-agents bien adaptée aux organisations humaines. Le fondateur du concept de Holon Arthur Koestler (Koestler, 1969) a étudié les organismes vivants et les organisations sociales et il a constaté que dans la vie réelle, une entité, pouvant être un tout ou une partie, ne peut être considérée comme un absolu.

Aujourd'hui, les chercheurs commencent à utiliser ce paradigme dans leurs recherches telles que (Gamboa Quintanilla *et al.,* 2015) qui a utilisé le paradigme Holon dans les systèmes manufacturiers pour concevoir un système flexible et réactif assurant ses services. Les auteurs dans (Borangiu *et al.,* 2015) présentent un ensemble des travaux qui ont appliqué le paradigme holonique particulièrement dans les systèmes industriels. Dans cette perspective, notre prochaine réflexion de recherche sera consacrée à étudier les interactions entre le service de production, le service de qualité et le service de maintenance et les risques pouvant se produire sur ces services. Dans ce cas, nous allons considérer chaque service comme étant un SMA et l'entreprise comme étant un Holon composée de plusieurs SMA. L'objectif est de piloter la performance de l'entreprise.

Nous envisagerons aussi d'appliquer la méthodologie proposée dans une entreprise marocaine. Il serait également intéressant de coupler le simulateur proposé avec d'autres logiciels que cette entreprise peut utiliser tels que l'ERP, pour couvrir un large périmètre de gestion y compris la gestion des risques industriels et professionnels.

Ce travail de recherche ne se limite donc pas aux résultats présentés dans cette thèse, mais plusieurs pistes de réflexion peuvent être envisagées selon la mesure afin d'adapter notre méthodologie au contexte de l'entreprise en question.

BIBLIOGRAPHIE GÉNÉRALE

Aaronson, S., 2005. NP-complete problems in physical reality. ACMSIGACT News 36 (1), 30–52 (2005).

Acronymics Inc., 2004. AGENTBUILDER: An Integrated Toolkit for Constructing Intelligent. Software Agents. Reference Manual. http://www.agentbuilder.com.
Archived at http://www.webcitation.org/6QWerbbZQ.

AFSCET, Donnadieu, G., Durand, D., Neel, D., Nunez, E., Saint-Paul, L., 2003. L'Approche systémique: de quoi s'agit-il ? Synthèse des travaux du Groupe AFSCET, " Diffusion de la pensée systémique".

Aiguier, M. 2014. Boulanger, F., Krob, D., Marchal, C., 2014. Complex Systems Design and Management/ Springer International Publishing Switzerland, 2014.

Aissani, N., Beldjilali, B., Trentesaux, D., 2009. Dynamic scheduling of maintenance tasks in the petroleum industry: A reinforcement approach. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 22, pp. 1089-1103.

Aissani, N., Guetarni, I.H.M., 2015. From Centralized Modelling to Distributed Design in Risk Assessment and Industrial Safety: Survey and Proposition. Service Orientation in Holonic and Multi-Agent Manufacturing. Springer International Publishing Switzerland 2015, Studies in Computational Intelligence 594, pp.125-134.

Almeder, C., Preusser, M., 2007. A hybrid Simulation Optimization approach for supply chains. Proceeding EUROSIM/ SLOSIM, 09-13 September 2007, Ljubljana, Slovenia. pp. 1-6.

Aloui, S., 2007. Thèse: Contribution à la modélisation et l'analyse du risque dans une organisation de santé au moyen d'une approche système, l'Ecole des Mines de Paris.

Al-Suwailem, S., 2012. Complexity and endogenous instability. Res. Int. Business Finance (2012). Elsevier.

Alexander, R., Kelly, T. 2013. Supporting systems of systems hazard analysis using multi-agent simulation. *Safety Science*, 51, pp. 302-318.

Andersen, H., Casal, J., Dandrieux, A., Debray, B., Dianous, V.D., Duijm, N.J., Delvosalle, C., Fievez, C., Goossens, L., Gowland, R.T., Hale, A.J., Hourtolou, D., Mazzarotta, B., Pipart, A., Planas, E., Prats, F., Salvi, O., Tixier, J., 2004. Aramis user guide, 2004.

Anderson, P. W., 1972. More is different. Science 177, 393–396 (1972).

Arenas, A., DiazGuilera, A., Kurths, J., Moreno, Y., Zhou, C., 2008. Synchronization in complex networks. Physics Reports 469, 93–153 (2008).

Arthur, W. B., 2015. Complexity and the Economy. Oxford University Press 2015.

Arunraj, N.S., Maiti, J., 2007. Risk-based Maintenance, Techniques and Applications. Journal of Hazardous Materials. 142, pp. 653-661.

Aubert-Lotarski, 2002. Agir en situation complexe, L'Approche systémique, Note de synthèse 4,http://www.esen.education.fr/fileadmin/user_upload/Contenus/Profils/gapfpe/kits/grh_app/notes_synthese/note_4_approche_systemique.pdf.

Austin, J.L., 1962. How to do Things with words. Clarendon Press.

Axelrod, R., 2006. The Evolution of Cooperation. (Basic Books, New York, 2006).

Badii, R., Politi, A., 1997. Complexity: Hierarchical Structure and Scaling in Physics", (Cambridge University Press, Cambridge, 1997).

Bak, P., Tang, C., Wiesenfeld, K., 1987. Self-organized criticality: An explanation of the 1/f noise. Phys. Rev. Lett. 59, 381–384 (1987).

Bak, P., 1996. How Nature Works: The Science of Self-Organized Criticality. (Copernicus, New York, 1996).

Baker, J.A., 2007. The Report of the BP US Refineries Safety Review Panel. US Chemical and Hazard Investigation Board, Washington.

Bakhta, N., 2013. Multi-agent model for designing a support system of collective decision. Thesis in Computer Science. University of Oran.

Ballerini, M., Cabibbo, N., Candelier, R., Cavagna, A., Cisbani, E., Giardina, I., Orlandi, A., Parisi, G., Procaccini, A., Viale, M., Zdravkovic, V., 2008. Empirical investigation of starling flocks: A benchmark study in collective animal behavior, Animal Behavior 76, 201–215 (2008).

Banks, J., Ed., 1998. Handbook of Simulation: Principles, Methodology, Advances, Applications, and Practice. John Wiley & Sons, New York, NY.

Banks, J., Carson, J.S., Nelson, B.L., Nicol, D.M., 2005. Discrete-Event System Simulation. Fourth Edition, Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ.

Barahona, F., Ettl, M., Petrik, M., Rimshnick, P., 2013. Agile logistics simulation and optimization for managing disaster responses. Proceedings of the 2013 Winter Simulation Conference, 978-1-4799-2076-1/13/$31.00 ©2013 IEEE, pp. 3340-3351.

Barbet L., Blaise J.C., Bonnaud C., Caillet J.P., Grusenmyer C., Pomian J.L., Tierno O., 2005. Maintenance of risk activities ED123. Sheets INRS Safety Practices.

Barbet L., Blaise J.C., Bonnaud C., Caillet J.P., Grusenmyer C., Pomian J.L., Tierno O., 2013. Maintenance of risk activities ED123. Sheets INRS Safety Practices.

Barrat, A., Barthelemy, M., Espignani, A., 2008. Dynamical Processes on Complex Networks, (Cambridge University Press, Cambridge, 2008).

Baston R.G, Ray P.S., Wan Q., Weems W.H., 1999. How preventive maintenance impacts Gatlinburg TH. Maintenance and Reliability Centre, University of Tenessee.

Batty, M., 2007. Cities and complexity, (MIT Press, Cambridge, MA, 2007).

Batty, M., 2008. The size, scale, and shape of cities, Science 319, 769–771 (2008).

Bazan, P., German, R., 2012. Hybrid simulation of renewable energy generation and storage grids. Proceedings of the 2012 Winter Simulation Conference, 978-1-4673-4781-5/12/$31.00 ©2012 IEEE.

Behdani, B., Lukszo, Z., Adhitya, A., Srinivasan, R., 2010. Performance Analysis of a Multi-plant specialty chemical manufacturing enterprise using an agent-based model. Computers and Chemical Engineering, vol 34, Issue 5, pp. 793-801.

Belhaj, R., Tkiouat, M., 2014. Conducting a SWOT analysis with a prioritizing model based on Fuzzy Inference System, Decision support tool in the Strategic Human Resources Management. European Journal of Economics Finance and Administrative Science, 69, 59-69.

Belhaj, R., Tkiouat, M., 2015. Including client opinion and employee engagement in the Strategic Human Resource Management. An advanced SWOT- FUZZY decision making tool. International Journal of Human Capital and Information Technology Professionals, July-September 2015, Vol. 6, No. 3, 20-34.

Bellifemine, F., Caire, G., Poggi, A., Rimassa, G., 2003. JADE: A white Paper. EXP in search of innovation, 3(3), 6-19.

Ben Kahla, I., 2011. Gestion des risques et aide à la décision dans la chaîne logistique hospitalière: Cas des blocs opératoires du CHU Sahloul. Laboratoire LAGIS, FRE CNRS 3303 à l'Ecole Centrale de Lille et l'Unité de Recherche TRANSALOG, Tunis

Bennett, C. H., 1990. How to define complexity in physics, and why, (editor), Complexity, Entropy, and the Physics of Information," pp. 443–454 (Addison-Wesley, Reading, MA, 1990).

Berry, B., Kiel, J. L., L. D., Elliott, E., 2002. Adaptive agents, intelligence, and emergent human organization: Capturing complexity through agent-based modeling, Vol. 99, Suppl.3 of Proc. Natl. Acad. Sci. USA (2002).

Bertalanffy, V. L., 1968. General systems theory, foundation, development, applications. New York, USA.

Bettencourt, L. M. A., Lobo, J., Helbing, D., Kuhnert, C., West, G. B., 2007. Growth, innovation, scaling, and the pace of life in cities, Proc. Natl. Acad. Sci. USA 104, 7301–7306 (2007).

Bettencourt, L. M. A., West, G. B., 2010. A unified theory of urban living, Nature 467, 912–913 (2010).

Blackman, H.S., Siu, N., Mosleh, A., 1998. Human Reliability Models: Theoretical and Practical Challenges. International Workshop Series on Advanced Topics in Reliability and Risk Analysis. Centre for Reliability Engineering, University of Maryland.

Boccaletti, S., Latora, V., Moreno, Y., Chavez, M., Hwang, D.-U., 2006. Complex networks: Structure and dynamics, Physics Reports 424, 175–308 (2006)

Booch, G., Rumbaugh, J., Jacobson, I., 2000. The unified software development process. New York, USA: Adisson-Wesley.

Borangiu, T., Thomas, A., Trentesaux, D., 2015. Service Orientation in Holonic and Multi-Agent Manufacturing. Studies in Computational Intelligence, Springer, Vol 594.

Borer, R., Benetos, K., 2005. Construction of a mental model: cognitivism glossary of terms.

Borshchev, A. V., Karpov, Yu. G., Kharitonov, V. A., 2002. Distributed simulation of hybrid systems with AnyLogic and HLA. Future Generation Computer Systems. 18(6): 829-839.

Borshchev, A., 2013. The Big Book of Simulation Modeling: Multimethod Modeling with Anylogic 6. AnyLogic North America. ISBN: 978-0-9895731-7-7.

Boucly, F., 1998. Le management de la maintenance – Évolution et mutation, Afnor gestion, 309 p.

Boudiaf, B., Zebirate, S., Aissani, N., Chaker, A., 2015. A Multi-Agent Based Platform for Safety Control. Service Orientation in Holonic and Multi-Agent Manufacturing. Springer International Publishing Switzerland 2015, Studies in Computational Intelligence 594, pp.135-143.

Boulanger, J. L., Bon, P., Mariano, G., 2003. Semi formal modeling and formal specification: UML & B in simple railway application'. ICSSEA.

Bouloiz, H., Garbolino E., Tkiouat, M., 2009. Contribution of a systemic modelling approach applied to support risk analysis of a storage unit of chemical products. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 23, pp. 312-322.

Bouloiz, H., Garbolino, E., Tkiouat, M., 2011. Risk Analysis Model Using UML and MADS model. Open Journal of Safety Science and Technology, 1, 108-114.

Bouloiz, H., Garbolino, E., Tkiouat, M., Guarnieri, F., 2013. A system dynamics model for behavioral analysis of safety conditions in a chemical storage unit. Safety Science, 58, pp. 32-40.

Bouloiz, H., Garbolino, E., Tkiouat, M., Bendaha, T., 2014. A conceptual and cognitive model for occupational hazards analysis in maintenance tasks', International Journal of Computer Aided Engineering. ISSN: 1071-2317, Vol.24, Issue.1, January, pp.1113-1119.

Bouzidi-Hassini, S., Benbouzid-Si Tayeb, F., Marimier, F., Rabahi, M., 2015. Considering human resource constraints for real joint production and maintenance schedules. Computers & Industrial Engineering, Vol 90, pp. 197-211.

Braha, D., Reich, Y., 2003. Topological Structures for Modeling Complex Engineering Design Processes. Research in Engineering Design, 14 (4), pp. 185-199.

Braha, D., Bar-Yam, Y., Minai, A., 2006. Complex Engineered Systems. ISBN-13 978-3-540-32831-5 Springer Berlin Heidelberg New York.

Bratman, M.E., 1987. Intention, Plans, and Practical Reason, Harvard University Press.

Brazier, F.M.T., Dinnin-Kepliczb, M., Jennings, N.R., Treur, J., 1997. DESIRE: Modelling Multi-Agent Systems, in a Compositional Framework. International Journal of Cooperative Informations Systems, 6(1): 64-94.

Briot, J.P., Demazeau, Y., 2001. Introduction aux agents, Principes et architecture des systèmes Multi-Agents. Collection IC2, Hermès.

BSI OHSAS 18001. 2005. Occupational Health and Safety Management Systems- Specification. England: BSI

Cambien, A., 2007. Une introduction à l'approche systémique. Les rapports d'étude, Certu, N° Production 13029 N° Produit 01.

Carlson, J. M., Doyle, J., 1999. Highly optimized tolerance: A mechanism for power laws in designed systems, Phys. Rev. E 60, 1412–1427 (1999).

Carrillo-Castrillo, J.A., Rubio-Romero, J.C., Guadix J., Onieva L., 2015. Risk assessment of maintenance operations: the analysis of performing task and accident mechanism. International Journal of Injury Control and Safety Promotion, Volume 22, Issue 3, 2015, pp. 267-277. doi: 10.1080/17457300.2014.939196.

Ccps, C., 1992. Guidelines for Hazard Evaluation Procedure with Worked Examples, 2nd Edition, CCPS AIChE, New York.

CE (European Commission), 1999. The concerted Action on Formal Safety and Environmental Assessment of Ship operations. Report y Germanischer Lloyd and Det Norske Veritas, project funded by the European Commission under the Transport RTD, Program of the 4th Framework Programme, 1999.

CEI 50 (191). 1990. International Electro-Technical Vocabulary, Chapter 191: Dependability and Quality of Service. CEI.

CERT – Centre d'études sur les réseaux, les transports, l'urbanisme et les constructions publiques, 2007. Une introduction à l'approche systémique, Appréhender la complexité, Commanditaires : Frédéric Lasfargues (Ex-Certu) Christophe Dalin (Certu), Rédactrice : Aurore Cambien (Certu/ URB-Our), Relecteurs assurance qualité : Dalin Christophe Frédéric Lasfargues Jean Charles Castel Nicolas Vernay (Partie philosophique).

Challet, D., Zhang, Y.C., 1997. Emergence of cooperation and organization in an evolutionary game," Physica A 246, 407–418 (1997).

Chaigneau, P., 2011. Control and structure in complex systems, Research paper, Université Paris7-Denis Diderot 2011.

Chaib-draa, B., Moulin, B., Mandiau, R., Millot, P., 1992. Trends in distributed Artificial Intelligence. Artificial Intelligence Review 6, 35-66.

Chaib-draa, B., Jarras, I., Moulin, B., 2001. Systèmes multi-agents : principes généraux et applications. Editions J.P. Biot, Demazeau, Agent et systèmes multi-agents, Hermès, 2001.

Chaib-draa, B., Jarras, I., 2002. Aperçu sur les systèmes multi-agents, Scientific Series. Montréal Juillet 2002

Chan, S., 2001. Complex Adaptive Systems. ESD.83 Research Seminar in Engineering Systems October 31, 2001/ November 6, 200.

Chapurlat, V., 2007. Vérification et validation de modèles de systèmes complexes: application à la Modélisation d'Entreprise, Université Montpellier II, France. HdR.

Cherkaoui, A., Lopez, P., 2009. 'CO2 Storage Risk Assessment: Feasibility Study of the Systemic Method MOSAR'.

Claver J.-F., Gélimier J., Pitt D., 1997. Flow management enterprises, modelling and simulation, Hermes Editions.

Cohen, R., Havlin, S., 2010. Complex Networks: Structure, Stability and Function, (Cambridge University Press, Cambridge, 2010).

Collinot, A., Drogoul, A., 1998. La méthode de conception multi-agent CASSIOPEE : Application à la robotique collective. Revue d'intelligence artificielle, 12(1): 125-147.

Cover, T. M., Thomas, J. A., 1991. Elements of Information. Theory, (John Wiley, New York, 1991).

Craweley, F. Preston, M., Tyler, B., 1999. HAZOP: Guide to Best Practice. Institution of Chemical Engineers and European Process Safety Centre, Rugby.

Cuny, X., Gaillard, I., 2003. Occupational risks today: current problems, methodological perspectives and directions. In D.R. Kouabenan, M. Dubois (eds.), Occupational hazards, changing Approaches, new perspectives. Toulouse, Octers Editions, 25-36

Davis, M. D., 1997. Game Theory: A Nontechnical Introduction", (Dover, New York, 1997).

Dawkins, R., 2006. The Selfish Gene (Oxford University Press, Oxford, 2006).

Dekker, R., 1996. Application of Maintenance Optimization Models: a Review and Analysis. Reliab Eng and Syst Saf 51: 229–240.

Demazeau, Y., 1995. From interactions to collective behaviour in agent-based systems", 1995.

Demazeau, Y., 2001. Voyelles. Enabling memory to direct research, INP Grenoble, 2001.

Dennett, D. C., Brainchildren: Essays on Designing Minds, (MIT Press, Cambridge, MA, 1998).

De Rosnay, J., 1975. Le Macroscope, Vers une Vision Globale. Le Seuil.

Desroches, A., Leroy, A., Quaranta, J.F., Vallée, F., 2006. Dictionary of analysis and risk management. Lavoisier, p.232.

Desroches, A., Leroy, A., Vallée, F., 2007. Risk Management. Lavoisier, p. 101.

Djanatliev, A., German, R., 2015. Towards a guide to domain-specific hybrid simulation. Proceedings of the 2015 Winter Conference, 978-1-4673-9743-8/15/$31.00 IEEE, pp. 1609-1620.

DNV (Det Norske Veritas). 1995. Feasibility Study for Safety Assessment of RoRo Passenger Vessels. Report prepared by the Det Norske Veritas Limited, Technical Consultancy, London, UK.

Donnadieu, G., Karsky, M., 2002, La systémique, penser et agir dans la complexité. Paris : Editions de liaisons.

Drogoul, A., 1993. De la simulation multi-agent à la résolution collective de problèmes. Université Paris VI, 1993.

Drossel, B., Schwabl, F., 1992. Self-organized critical forest-fire model, Phys. Rev. Lett. 69, 1629–1632 (1992).

Dubois, M., 2003. Introduction. In D.R. Kouabenan, M. Dubois (eds.), Occupational Hazards, changing approaches new perspectives. Toulouse, Octars Editions, 13-19.

Durand, D., 2006. La systémique. Editions PUF, Collection Que sais-je ? 127 p.

Easley, D., Kleinberg, J., 2010. Networks, Crowds, and Markets, (Cambridge University Press, Cambridge, 2010).

Eisenmann, R. S., and Eisenmann, R.J., 1997. Applied condition monitoring. Machinery malfunction diagnosis and correction, vol. 13, 1997, pages 703–741.

Epstein, J. M., Axtell, R. L., 1996. Growing Artificial Societies: Social Science from the Bot-tom Up", (MIT Press, Cambridge, MA, 1996).

Erceau, J., Ferber, J., 1991. L'intelligence artificielle distribuée. Recherche 233 Juin 1991, Volume 22.

Erman, L.D., Hayes-Roth, F., Lesser V.R, Reddy, D.R., 1980. The Hearsay II speech understanding system; Integrating knowledge to resolve uncertainty, ACM Computing Survey, vol. 12, pp. 213-253.

EU-OSHA (European Agency for Safety and Health at Work), 2010. Maintenance and Occupational Safety and Health: A statistical picture. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities. ISBN-13: 978-92-9191-328-2.

Fallet-Fridry, G., 2012. Contribution à la modélisation et au traitement de l'incertain dans les analyses de risqué multidisciplinaires de système industriels- Application à la Source Froide d'une unité de production d'énergie. Other. Université de Lorraine. French. < tel-00781498>.

Faucher, C., Bertrand, F., Lafaye, J-Y., 2008. Génération d'ontologie à partir d'un modèle métier UML annoté, publié dans "RNTI 12 (2008) 65--84", Soumis le : Vendredi 26 Février 2010.

Feigenbaum, M., 1978. Quantitative universality for a class of non-linear transformations," J. Stat. Phys. 19, 25–52 (1978).

Flanagan, R., Norman, G., 1993. Risk Management and Construction Blackwell Science Ltd.

Flaus, J.M., Berthelier, E., Giannoccaro, F., 2010. Modélisation de systèmes organisationnels pour l'analyse des défaillances: application au plan de sauvegarde communal. 8ème Conférence Internationale de Modélisation et SIMulation - OSIM'10 - 10 au 12 mai 2010 - Hammamet - Tunisie « Evaluation et optimisation des systèmes innovants de production de biens et de services ».

Felberbauer, T., Altendorfer, K., 2014. Comparing the performance of two different customer order behavior within the hierarchical production planning. Proceedings of the 2014 Winter Simulation Conference, 978-1-4799-7486-3/14/$31.00 ©2014 IEEE, pp. 2227-2238.

Ferber J., 1995, Les systèmes multi-agents: Vers une intelligence collective. InterEditions, Paris.

Francastel, J.-C., Jourden, P., 2005. «Pratique de la maintenance industrielle : Méthodes – Outils - Applications, Ed. Dunod, Paris, mise à jour de juin 2005.

Fraser, M. D., Kumar, K., Vaishnavi, V. K., 1994. Strategies for incorporating formal specifications in software development. Communications of the ACM, Vol. 37, n10, pp. 74–84.

Frayert, J.M., D'amours, S., Rousseau, A., Harvey, S., Gaudreault, J., 2008. Agent-based supply chain planning in the forest products industry. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 25, n° 7-8, pp. 811-819.

Frery, F., 1992. Small epistemology of systemic chaos, labor ESCP Paper No. 93/114, "Expert System and strategies of power", No. 89-99.

Fung, R.Y.K., Chen, T., 2005. Multi-Agent Supply Chain planning and coordination architecture. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 25, n° 7-8, pp. 811-819.

Gallab, M., Bouloiz, H., Tkiouat, M., 2015a. Decision Support for Occupational Risk Overcome in Maintenance Activities. Science and Information Conference (SAI), pp.426-434, London-UK, 28-30 Juillet 2015. doi: 10.1109/SAI.2015.7237177. ISBN: 978-1-4799-8546-3.

Gallab, M., Bouloiz, H., Garbolino, E., Tkiouat, M., 2015b. Model for developing a database for risk analysis. Industrial Engineering and Systems Management (IESM), 2015 International Conference on, Seville, 2015, pp. 833-841. doi: 10.1109/IESM.2015.7380253

Gallab, M., Bouloiz, H., Tkiouat, M., Garbolino, E., ElKilni, M.A., 2016a. Simulation of Failure Scenarios related to Maintenance Activities. International Journal of Applied Engineering Research, Vol: 11, N°24, 2016, pp. 11935-11949.

Gallab, M., Bouloiz, H., Chater, Y., Tkiouat, M., 2016b. Towards a Simulation Model to Ensure the Availability of Machines in Maintenance Activities. International Journal of Computer, Electrical, Control and Information Engineering, Vol. 10, N°7, 2016, pp. 1213- 1217.

Gallab, M., Bouloiz, H., Tkiouat, M., 2017. Towards a model for developing an information system as a decision support to risk assessment. International Journal of Industrial and Systems Engineering, Vol. 25, N°1, pp. 110-129.

Gallo, A., 1999. The Animals, Psychology and Behaviour, p. 63.

Gamboa Quintanilla, F., Cardin, O., L'Anton, A., 2015. Process Specification Framework in a Service Oriented Holonic Manufacturing Systems. Service Orientation in Holonic and Multi-Agent Manufacturing. Springer International Publishing Switzerland 2015, Studies in Computational Intelligence 594, pp.81-89.

Gao, Y., Shang, Z., Kokossis, A., 2009. Agent-Based intelligent system development for decision support in chemical process industry. *Expert Systems with Applications*, Volume 36, Issue 8, October 2009, p. 11099-11107.

Garbolino, E., 2008. La défense en profondeur; contribution de la sûreté nucléaire à la sécurité industrielle. Edition LAvoisier, ISBN: 978-2-7430-1030-0, pp. 66.

Garbolino, E., Chery, J.P., Guanieri, F., 2009. Dynamic Systems Modelling to improve risk analysis in the context of seveso industries. Chemicals Engineering Transactions, vol. 17, pp. 373-378.

Garbolino, E., Chéry, J-P., Guarnieri, F., 2010. Modélisation dynamique des systèmes industriels à risques. Sciences du Risque et du Danger (SRD). Série Notes de synthèse et de recherche.

Gardner, M., 1970. Mathematical Games: The fantastic combinations of John Conway's new solitaire game life, Scientific American 223, 120–123 (1970).

Garey, M. R., Johnson, D. S., 1979. Computers and Intractability: A Guide to the Theory of NP-Completeness, (W. H. Freeman, San Francisco, 1979).

Garlick, A., 2007. Estimating Risk, a management approach. Gower Publishing Limited, England, pp 9-31.

Gell-Mann, M., 1994. The Quark and the Jaguar: Adventures in the Simple and the Complex. New York 1994.

Giannakis, M., Louis, M., 2011. A Multi-Agent based framework for supply chain risk management. Journal of Purchasing & Supply Management 17, 23–31.

Gilbert, N., 2007. Agent-Based Models, (Sage Publications, London, 2007).

Gintis, H., 2009. The Bounds of Reason: Game Theory and the Unification of the Behavioral Sciences, (Princeton University Press, Princeton, NJ, 2009).

Giraud L., Ait-Kadi, D., 2001. Maintenance: state of knowledge and exploratory study. Activities quotes of IRSST, Montreal (Quebec), 27.

Gleizes, M-P., Bernon, C., Migeaon, F., Gauthier, P., 2009. Development of methods of multi-agent systems. Software engineering, no 86 (2009): pp - 66.

Gordan, J., Kusek, M., Lovrek, I., Howlett, R., C., Jain, L., 2014. Agent and Multi-Agent Systems: Technologies and Applications. Proceedings of the 8th International Conference KES-AMSTA 2014. Chania, Greece, June 2014. Advances in Intelligent Systems and Computing, Vol.296.

Gould, S. J., 2002. The Structure of Evolutionary Theory", (Belknap Press, Cambridge, MA, 2002).

Gran, B., Bye, R., Nyheim, O., Okstad, E., Seljelid, J., Sklet, S., 2012. Evaluation of the risk OMT model for maintenance work on major offshore process equipment. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 25(3), 582e593.

Grignard, A., Taillandier, P., Gaudou, B., An Vo, D., Huynh, N., Drogoul, A., 2013. GAMA 1.6: Advancing the Art of Complex Agent-Based Modeling and Simulation. The 16th International Conference on Principles and Practices in Multi-Agent Systems (PRIMA), 8291, 242 – 258

Grigoryev, I., 2015. AnyLogic 7 in three days: A quick course in simulation modeling. ISBN-13: 978-1508933748.

Grimm, V., Railsback, S. F., 2005. Individual-based Modeling and Ecology (Princeton University Press, Princeton, NJ, 2005).

Groeneweg, J., Lancioni, G. E., Metal, N., 2002. In Bedford., and van Gelder. (Eds.), Tripod: 'Managing organisational components of business upsets' (pp. 707e712). Safety and Reliability, ISBN 90 5809 551 7.

Groner, M.L., Cox, R., Gettinby, G., Revie, C.W., 2013. Use of agent-based modeling to predict benefits of cleaner fish in controlling sea lice, lepeophtheirus salmonis, infestations on farmed atlantic salmon, salmo salar L. Journal of Fish Diseases 2013, 36, 195-208.

Grusenmyer, C., 2000. Maintenance Operation and safety interactions. Bibliographic study: Maintenance tasks: definition and characteristics contributing to their criticality. Scientific and Technical notes INRS, 188, 46 p.

Grusenmyer, C., 2002. Interactions maintenance, exploitation et sécurité: Etude exploratoire. Cahiers de notes documentaires. Notebooks of INRS, I86, pp, 53-66.

Grusenmyer, C., 2005a. Les accidents de travail lies à la maintenance, importance et caractérisation. Cahiers des notes documentaires, 4ème trim 2005, INRS, Paris.

Grusenmyer, C., 2005b. Les accidents de travail liés à la maintenance, Etude bibliographique, les notes scientifiques et techniques de l'INRS, 2005, 248, Vandoeuvre, 68p, Paris

Grusenmeyer, C., 2007. Sous-traitance et accidents. Exploitation de la base de données EPICEA de l'INRS. http://lara.inist.fr/handle/2332/1662.

Guo, Q., Zhang, M., 2009. A novel approach for multi-agent-based Intelligent Manufacturing System. Information Sciences, vol 179, Issue 18, pp. 3079-3090.

Gutiérrez, T.N., 2012. Une architecture de contrôle des systèmes complexes basée sur la simulation multi-agent. Thèse présentée et soutenue publiquement le pour l'obtention du Doctorat de l'Université de Lorraine.

Gutknecht, O., Ferber, J., 2000. Madkit: a Generic Multi-Agent Platform. Autonomous Agents. AGENTS 2000, Barcelona, ACM Press, 78 – 79, doi:10.1145/336595.337048.

Hale, A.R., Heming, B.H.J., Smit, K., Rodenburg, F.G.Th., Van Leeuwen, N.D., 1998. Evaluating safety in the management of maintenance activities in the chemical process industry. Safety Science, 28, 1, pp. 21-44.

Hardy, K., 2010. Contribution à l'Etude d'un Modèle d'Accident Systémique : le cas du Modèle STAMP : Application et Pistes d'Amélioration. Thèse Ecole Mines ParisTech, France.

Hassaine, L., 2009. Conception et réalisation d'un système de négociation automatique appliqué aux ventes en enchère.

Helbing, D., 1997. Traffic and related self-driven many-particle systems, Rev. Mod. Phys. 73, 1067–1141 (1997).

Helbing, D., Balietti, S., 2012. How to do Agent-Based Simulations in the Future: From Modeling Social Mechanisms to Emergent Phenomena and Interactive Systems Design. Doi 10.1007/978-3-642-24004-1 2, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012.

Héry, M., 2002. Besoins de recherche en santé au travail pour les salariés d'entreprises de sous-traitance interne, Pistes, 4, 1, lien internet : http://www.pistes.uqam.ca/v4n1/articles/v4n1a1.htm.

Heurtel, A., 2003. La gestion des risques techniques et des risques de management. CNRS- IN2P3/LAL.

Hewitt, C., 1977. Viewing Control Structures as Patterns of Message Passing. Artificial Intelligence, vol 8, N° 3, pp: 323-364.

Holling, C. S., 2001. Understanding the complexity of economic, ecological, and social systems, Ecosystems 4, 390–405 (2001).

Holland, J.H., 1992. Complex Adaptive Systems Daedalus, MIT Press, 1992, Vol 121, pages 17-30.

Hollnagel, E., 1998. Cognitive Reliability and Error Analysis Method: CREAM. Elsevier Science, Amsterdam.

Hollnagel, E., 2000. Looking for errors of omission and commission or The Hunting of the Snark revisited. Reliability Engineering and System Safety 68, 135–145.

Hollnagel, E., 2004. Barrier Analysis and accident prevention. Published by Ashgate publishing company, England, ISBN 0754643018.

Hopkins, A., 2008. Failure to Learn. The BP Texas City Refinery Disaster. CCH, Sydney.

Huget, M.P., 2005. Agent Communication. In Intelligent Decision support systems in Agent-Mediated Environments, vol. 115, frontiers in Artificial Intelligence and Applications. Gloria Phillips-wren and Lakhmi Jain (eds), IOS Press.

Idasiak, V., Kratz, F., David, P., 2010. MéDISIS, integrating dependability analysis to Model Based System Engeneering Processes. 17eme Congrès de Maîtrise des Risques et de Sûreté de Fonctionnement. 5-7 octobre 2010, La Rochelle.

IEC (International Electro-technical Commission). 1995. Dependability Management- Risk Analysis of Technological Systems (International Standard IEC 300-3-9), IEC, Geneva.

Iglesias, C.A., Garijo, M., Gonzalez, J.C., Velasco, J.R., 1998. Analysis and design of multi-agent systems using MAS-CommonKADS.

Ilachinski, A., 2001. Cellular Automata: A Discrete Universe, (World Scientific, Singapore, 2001)

ISO 14971. 2000. Application de la gestion des risques aux dispositifs médicaux ISO.

ISO/ CEI Guide 51. 1999. Aspects liés à la sécurité- principe directeur pour les inclure dans les normes ISO/CEI.

Jackson, M. O., 2008. Social and Economic Networks, (Princeton University Press, Princeton, 2008).

Jacobs, J., 1961. The Death and Life of Great American Cities, (Random House, New York, 1961).

Jarras, I., Chaib-draa, B., 2002. Apperçu sur les systèmes multi-agents. Série scientifique. Centre Interuniversitaire de recherche en analyse des organisations. Montréal, Canada, Juillet 2002.

Jasanoff, S., 1994. Learning from Disaster: Risk Management after Bhopal. University of Pennsylvania Press, Philadelphia, 361.

Jianxi, F., Yuanlue, F., 2012. Case-based Reasonind and Multi-Agents for Cost Collaborative Management in Supply Chain. Procedia Engineering, volume: 29, pp. 1088-1098.

Jinks, S., Scalan, J., Reed, P., Wiseall, S., 2010. Utilizing Dynamic Simulation to improve unit cost estimation and aid design decisions. Proceedings of the 2010 Winter Simulation Conference. p. 1758-1766.

Kaegi, M., Mock, R., Kroger, W., 2009. Analyzing maintenance strategies by agent-based simulations: A feasibility study. Reliability Engineering and System Safety, Vol 94, Issue 9, pp. 1416-1421.

Kamoun, M.A., 2007. Conception d'un système d'information pour l'aide au déplacement multimodal: Une approche multi-agent pour la recherche et la composition des itinéraires en ligne. Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lille et l'Université des Sciences et Technologies de Lille (LAGIS) / ESTAS de l'INRETS, France, 2007.

Kaplanoglu, V., 2014. Multi-agent based approach for single machine scheduling with sequence-dependent setup times and machine maintenance. Applied Soft Computing, Vol 23, pp. 165-179.

Karagiannis, G-M., 2010. Thèse: Méthodologie pour l'analyse de robustesse des plans de secours industriels.

Karsky, M., 2004. La dynamique des systèmes complexes ou la systémique de l'ingénieur, référence AG1565.

Karuna, H., Valckenaers, P., Saint-Germain, B., Verstraete, P., Zamfirescu, C.B., Van Brussel, H., 2005. Emergent Forecasting Using a Stigmergy Approach in Manufacturing Coordination and Control. Engineering Self-organising Systems: Methodologies And Applications, pp. 34-64.

Kauffman, S. A., 1995. At Home in the Universe, (Oxford University Press, Oxford, 1995).

Kim, S., Mungle, S., Son, Y.J., 2013. An agent-based simulation approach for dual toll pricing of hazardous material transportation. Proceedings of the 2013 Winter Simulation Conference. 978-1-4799-2076-1/13/$31.00 ©2013 IEEE, pp. 2520-2531.

Kinny, D., Georgeff, M., Rao, A., 1996. A Methodology and Modelling Technique for Systems of BDI agents. W.Van de VELDE et J.W. PERRAM, éditeurs : Agents Breaking Away : Proceeding of the Seventh European Workshop on Modelling Autonomous Agents in a Multi-Agent World, vol. 1038 de Lecture Notes in Artificial Intelligence (LNAI), pages 51-71. Springer-Verlag.

Kizim, A.V., 2013. Establishing the maintenance and repair body of knowledge: Comprehensive approach to ensuring equipment maintenance and repair organization efficiency. Original Research Article Procedia Technology, Volume 9, 2013, pp. 812-818.

Kizim, A.V., Denisov, M.V., Kamaev, V.A., 2013. Organization of the repair and maintenance in road sector with ontologies and multi-agent systems. Procedia Technology, Volume 9, Pages 819-825.

Khan, F. I., Abbasi, S. A., 1998. Techniques and Methodologies for Risk Analysis in Chemical Process Industries. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Vol. 11, No. 4, pp. 261-277.

Khan, F. I., Haddara, M., 2003. Risk-based maintenance (RBM): a quantitative approach for maintenance/inspection scheduling and planning. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 16(6), pp.561–573.7.

Khan, K., Sadiq, R., Haddara, M., 2004. Risk-based inspection and maintenance (RBIM): multi-attribute decision making with aggregative risk analysis. Process Safety and Environmental Protection, 82, pp. 398–411.

Khelifati, S., Benbouzid-Sitayeb, F., 2011. A multi-agent approach for scheduling jobs and maintenance operations in the flowshop sequencing problem. International Journal of Intelligent Engineering Informatics, 2(1), 47–70.

Khlebopros, R., Okhonin, V., Fet, A., 2007. Catastrophes in nature and society, mathematical modeling of complex system.

Kletz, T., 2001. Learning from Accidents. Gulf Professional Publishing, Oxford.

Kletz, T., 2003. Still Going Wrong. Elsevier, Amsterdam.

Koestler, A., 1969. The Ghost in the MAhine, London: Arkana books, 1969.

Koivisto R., Wessberg N., Eerola A., Ahlqvist T., Kivisaari S., Myllyoja J., Halonen M., 2009. Integrating future-oriented technology analysis and risk assessment methodologies. Technological Forcasting and Social Change (76) 1163-1176.

Koza, J. R., Keane, M. A., Streeter, M. J., 1992. Evolving inventions," Scientific American 288 (2), 52–59 (1992).

Kruger, G.H., Shih, A., Hattingh, D., Niekerk, T.I.V., 2011. Intelligent machine agent architecture for adaptive control optimization of manufacturing processes. Advanced Engineering Informatics, vol 25, Issue 4, pp. 783-796.

Labarthe, O., 2006. Modélisation et simulation orientées agents de chaînes logistiques dans un contexte de personnalisation de masse: modèles et cadre méthodologique, Thèse de Doctorat en cotutelle, Faculté des études supérieurs de l'Université Laval, Québec et Faculté des sciences et techniques de l'Université Paul Cézanne, Marseille, 2006.

Labarthe, O., 2007. Modelling and simulation oriented supply chain officers in a mass customization context models and methodological framework, PhD thesis under joint supervision, Faculty of Graduate Studies at Laval University, Quebec, and Faculty of Science and Technology of the University Paul Cézanne, Marseille, 2006.

Lachtar, D., Garbolino, E., 2012. Performance Assessment of Crisis Management Plans with the Contribution of multi-agent Systems. AIDIC, Chemical Engineering Transactions, Vol 26, pp. 447-270.

Lamine, E., 2001. Définition d'un modèle de propriété et proposition d'un langage de spécification associé : LUSP, Université Montpellier II. PhD.

Langton, C. G., 1986. "Studying artificial life with cellular automata," C. G. Langton, Physica D 22, 120–149 (1986).

Larsen, D., Cameron, F. L., 2008. Complex Systems and Applied Linguistics. Oxford University Press 2008.

Ladyman, J., Lambert, J., Wiesner, K., 2013. What is a Complex System?. European Journal for Philosophy of Science 3: 33–67. doi:10.1007/s13194-012-0056-8.

Lapointe, J.B., St-Marseille, M., 1997. La gestion des équipements : vers l'entretien préventif. Guide pour la PME 2ème édition.

Laurent, A., 2011. Sécurité des procédés chimiques (2° Éd.). Connaissances et méthodes d'analyse des risques. Coll. Génie des procédés de l'École de Nancy. 608p.

Law, A.M., Kelton, W.D., 2000. Simulation Modeling and Analysis, 3rd Ed., New York: McGraw-Hill.

Le, N., De Dianous, V., 2008. Evaluation des dispositifs de prévention et de protection utilisés pour réduire les risques d'accidents majeurs, Ω10, Rapport d'étude n°DRA-08-95403-01561B, 01/09/2008 : INERIS pour le Ministère chargé de l'environnement, rapport disponible sur www.ineris.fr.

Le Gallou, F., 1993. Systémique: Théorie et applications. Editions Tec Et Doc.

Le Moigne, J.L., 1977. La théorie du système général. Editions PUF, Collection Systèmes-Décisions.- 258 p.

Le Page, C., Bousquet, F., 2007. The Cormas platform: Tutorial. ESSA 2007: 4th Conference for European Association of social Simulation. Toulouse, France.

Lesser, V.R., Corkill, D.G., 1983. The distributed vehicle Monitoring Testbed: A tool for investigating distributed problem solving networks, Al Magazine, vol. 4, N° 3, pp. 15-33.

Lesne, A., 2011. Complexity of life. 2011.

Leverson, N., 2004. A new accident model for engineering safer systems. Safety Science 42, 237-270.

Leveson, N., Daouk, M., Dulac, N., and Marais, K.., 2004. Applying STAMP in accident analysis, submitted for publication, (http://sunnyday.mit.edu/accidents/walkerton.pdf).

Leveson, N., Cutcher-Gershenfeld, J., Carroll, J.S., Barrett, B., Brown, A., Dulac, N., Marais, K., 2005. System approaches to safety: NASA and the space shuttle disasters. In: Starbuck, W.H., Farjoun, M. (Eds.), Organization at the Limit. Lessons from the Columbia Disaster. Blackwell Publishing, Oxford.

Levin, S. A., 1998. Ecosystems and the biosphere as complex adaptive systems. Ecosystems 1, 431–436 (1998).

Lewis, F. L., Zhang H., Hengster-Movric, K., Das, A., 2014. Cooperative Control of Multi Agent Systems. Optimal Design and Adaptive Approaches / Chapter 1: Introduction to Physics and Synchronization in Nature and Cooperative Control for Multi-Agent Systems on Graphs. Springer-Verlag London 2014.

Lim, S., 2008. Influence des enseignements tirés d'accidents impliquant des stockages de GPL dans l'évolution des guides de bonnes pratiques à l'étranger. Rapport d'étude n°DRA-08-85166-00650B, 04/09/2008 : INERIS pour MEEDDAT/SEI/BARPI.

Lind, S., 2008. Types and Sources of fatal and severe non-fatal accidents in industrial maintenance. International Journal of Industrial Ergonomics, 38, pp. 927-933.

Lorenza, S., Zucker, J.D., 2013. Abstraction in Artificial Intelligence and Complex Systems. Springer Science + Business Media New York 2013.

Luke, S., Cioffi-Revilla, C., Panait, L., Sullivan, K., Balan, G., 2005. MASON: A Multi-Agent Simulation Environment. In Simulation: Transactions of the society for Modeling and Simulation International, 82(7), 517 – 527. [doi:10.1177/0037549705058073].

Lynch, C., Padilla, J., Diallo, S., Banks, C., 2014. A multi-paradigm modeling framework for modeling and simulating problem situations. Proceedings of the 2014 Simulation Conference, 978-1-4799-7486-3/14/$31.00 ©2014 IEEE, pp. 1688-1699.

Macy, M. W., Willer, R., 2002. From factors to actors: Computational sociology and agent based modeling, Annual Review of Sociology 28, 143–166 (2002).

Magarino, I.G., Gutiérrez, C., 2013. Agent-oriented modelling and development of a system for crisis management. Expert Systems with Applications, vol 40, Issue 16, pp. 6580-6592.

Male, G.E. 1998. Safety of transport and machinery. A survey of maintenance accidents attributed to technological failing. Health and Safety Executive Specialist Inspector Reports n°52, Sheffield (United Kingdom), February, 35.

Mandelbrot, B. B., 2006. The Misbehavior of Markets: A Fractal View of Financial Turbulence, (Basic Books, New York, 2006).

Magne, L., Vasseur, D., 2006. Industrial risks, complexity, uncertainty and decision: an interdisciplinary approach. Lavoisier, Collection EDF RandD, p. 181.

Manson, S. M., 2001. Simplifying Complexity: A Review of Complexity Theory. Geoforum, No. 32, pp. 405-414, 2001.

Marguin, J., 2002. Approche systémique des crises et aide à la décision stratégique, Revue l'Armement, N°77, p155-161.

Marmier, F., Varnier, C., Zerhouni, N., 2009. Proactive, dynamic and multi-criteria scheduling of maintenance activities. International Journal of Production Research, 47(8), 2185–2220.

Mason, S., 1990. Improving plant and machinery maintainability. Applied Ergonomics, 21, pp. 15-24.

May, R. M., 1972. Will a large complex system be stable?, Nature 238, 413–414 (1972).

May, R. M., 1976. Simple mathematical models with very complicated dynamics, Nature 261, 459–467 (1976).

Mazhari, E.M., Zhao, J., Celik, N., Lee, S., Son, Y.J., Head, L., 2009. Hybrid simulation and optimization based capacity planner for integrated photovoltaic generation with storage units. Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference, 978-1-4244-5771-7/09/$26.00 ©2009 IEEE, 1511-1522.

Mazouni, M.H., 2008. For a Better Approach to Risk Management: From the Ontological Modelling of Accidental Process in Interactive System Decision Support, Thesis PhD from the Institute National Polytechnic de Lorraine Specialty: Automatic, Signal Processing and Computer Engineering, November 2008, pp. 39-42.

Mazyad, H., 2013. An Approach to Multi-Agent Architecture for P2P Collaborative Learning (thesis). University of Litoral côte d'opale. Laboratoire informatique et image de signale de la côte d'opale.

Medina Oliva, G., 2011. Modélisation conjointe des connaissances muli-points de vue d'un système industriel et de son système de soutien pour l'évaluation des stratégies de maintenance. Automatic. Université Henri Poincaré- Nancy I, 2011. French. <tel-00702247>.

Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable, 2006a. Compréhension des phénomènes et modélisation : la dispersion atmosphérique. - 12p.

Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable, 2006b. Guide pour l'estimation des dommages matériels aux biens des tiers en cas d'accidents majeurs.

Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable, 2006c. Les phénomènes dangereux associés aux GPL dans les établissements de stockage hors raffineries et pétrochimie : le BLEVE. - 18p.

Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable, 2006d. Les phénomènes dangereux associés aux GPL dans les établissements de stockage hors raffineries et pétrochimie : Explosion de gaz à l'air libre (UVCE).- 22p.
Mitchell, M., 1996. Introduction to Genetic Algorithms", (MIT Press, Cambridge, MA, 1996).
Mitzenmacher, M., A brief history of generative models for power law and lognormal distributions," Internet Mathematics 1, 226– 251 (2004).
Monchy, F., 1996. La fonction maintenance. Formation à la gestion de la maintenance industrielle. Paris, Masson, 457 p.
Monostori, T., Vancza, J., Kumara, S.R.T., 2006. Agent-based systems for manufacturing. Annals of the CIRP, vol. 55, n°2, pp. 697-720.
Monteau, M., Pham, D., 1987. Occupational accident: Evolution of conceptions. In C. Lévy.
Moore, C., Mertens, S., 2011. The Nature of Computation", (Oxford University Press, Oxford, 2011).
Morin, E., 1990. Introduction à la pensée complexe, Paris : ESF. 158p. ISBN: 2710108003, 9782710108009.
Morin, E., 2005. Introduction à la pensée complexe. Editions du Seuil, collection Points.- 158p.ISBN: 2020668378, 9782020668378.
Mouilleau Y., Lechaudel J.F., 1999. Guide des méthodes d'évaluation des effets d'une explosion de gaz à l'air libre. INERIS.- 166p.
Myerson, R. B., 1997. Game Theory: Analysis of Conflict, (Harvard University Press, Cambridge, MA, 1997).
Naciri, N., Tkiouat, M., 2015a. Agent Based Platforms: Review and Comparison. International Journal of Applied Engineering Research (IJAER), Vol. 10, N°14, pp. 34224-34229, 2015.
Naciri, N., Tkiouat, M., 2015b. Complex system theory development. International Journal of Latest Research in Science and Technology, Vol.4, Issue 6, pp. 93-103.
Nagel, Schreckenberg, M., 1992. A cellular automaton model for freeway traffic, K., J. Phys. I France 2, 2221–2229 (1992).
Nathanaël Friant, Soetewey, S., Marc Demeuse, M., Hourez, J., et Wijsen, J., 2011. Le système éducatif : un système complexe que l'on peut modéliser. La magazine de l'universite de mons : élément mars 2011.
Napoli, A., 2001. Formalisation of knowledge and modelling language contribution: application using the modeling of the behaviour of forest fires. Catalog Mines Paris-Tech.
Newman, M. E. J., 2005. Power laws, Pareto distributions and Zipf's law. Contemporary Physics 46, 323–351 (2005).
Newman, M. E. J., 2010. Networks: An Introduction, (Oxford University Press, Oxford, 2010).
Newman, M. E. J, 2011. Complex Systems: A Survey. Am. J. Phys. 79, 800-810 (2011).
Nguyen Thi, P.K., 2012. Politiques de maintenance et d'investissement sous evolution technologique incertaine. Thèse doctorat, Ecole Centrale de Nantes.
Nguyen, C.K.Q., Dietz, J.E., Liles, S., Raskin, V., Springer, J., 2015. Cyber Defense Econometric of a power grid distribution infrastructure. Proceedings of the 2015 Winter Simulation Conference, 978-1-4673-9743-8/15/$31.00 ©2015 IEEE, 906-907.
Nicolet-Monnier, M., 1996. Integrated Regional Risk Assessment: The Situation in Switzerland. International Journal of Environment and Pollution, Vol. 6, No. 4-5, pp. 441-461.
Nowak, M. A., 2006. Evolutionary Dynamics: Exploring the Equations of Life, (Belknap Press, Cambridge, MA, 2006).
Nwana, H., Lee, L., Jennings, N., 1996. Coordination in software agent systems, BT Laboratories internal report.
OECD: Emerging risks in the 21st century an agenda for action.
OECD: Future Global Shocks, improving risk governance. Reviews of Risk. Management Policies
Øien, K., Schjølberg, P., Meland, O., Leto, S., and Spilde, H., 2010. Correct maintenance prevents major accidents. MaintWorld, 26 and 28.
Okoh, P., Haugen, S., 2013. The influence of Maintenance on some selected major accidents. CEt Chemical Engineering Transactions, Vol. 31, 2013.
Okoh, P., Haugen, S., 2014. A study of maintenance-related major accident cases in the 21st century. Process Safety and Environmental Protection, http://dx.doi.org/10.1016/j.psep.2014.03.001.
OMG, Object Management Group, 2006. UML 2.1 Superstructure Specification. Document: ptc/06-04-02.

Osgood, N., Liu, J., 2014. Towards closed loop modeling: Evaluating the prospects for recurrently reground aggregate simulation models using particle filtering. Proceedings of the 2014 Winter Simulation Conference, 978-1-4799-7486-3/14/$31.00 ©2014 IEEE, pp. 829-841.

Page, S. E., Blume, L., Durlauf, S., 2008. Agent based models, The New Palgrave Encyclopedia of Economics, (Palgrave Macmillan, Basingstoke, 2008), 2nd edition.

Palmer, R. G., Arthur, W. B., Holland, J. H., LeBaron, B., Tayler, P., 1994. Artificial economic life: a simple model of a stock market, Physica D 75, 264–274 (1994).

Panteleev, V.V., Kamaev, V.A., Kizim, A.V., 2014. Developing a Model of Equipment Maintenance and Repair Process at Service Repair Company Using Agent-Based Approach. Procedia Technology, Vol 16, pp. 1072-1079.

Parrott, L., 2002. Complexity and the Limits of Ecological Engineering, Transactions of the ASAE, No. 45, pp. 1697-1702, 2002.

Paté-Cornell, E., Murphy, D.M., 1996. Human and management factors in probabilistic risk analysis: the SAM approach and observations from recent applications. Reliability Engineering and System Safety. Elsevier Science Ltd.p. 115-126.

Paté-Cornell, M.E., 1999. A post mortem analysis of the piper alpha accident: technical and organizational factors. Risk Analysis 13 (2), pp. 215–232.

Peitgen, H.O., Jurgens, H., Saupen, D., 2004. Chaos and Fractals, (Springer, Berlin, 2004).

Périlhon, P., 1999. Risk to Risk Analysis: Development of a MOSAR method, method organized and systemic risk analysis, the working document.

Perilhon, P., 2000. Methodical elements, Phoebus n°12, January, February, March p.31 à 49.

Perrow, C., 1994. The limits of safety: the enhancement of a theory of accidents. Journal of Contingencies and Crisis Management, 2, (4).

Picard, G., Gleizes, MP., 2004. The ADELFE Methodology- Designing adaptive Cooperative Multi-Agent Systems, volume methodologies and Software Engineering for Agent Systems. Chapter 8, pages 157-176. Kluwer.

Pichot, C., 2006. Health and Safety on the Work Floor: Maintenance Jobs. AFIM, Paris, France.

Pierini, T., 2015. Transport de gaz de pétrole liquéfié (GPL). Environnement-Sécurité| Sécurité et gestion des risques. Techniques de l'ingénieur, réf: SE8120, 10 juillet 2015.

Pintelon, L., Parodi-Herz A., 2008. Maintenance: An evolutionary Perspective. Complex System Maintenance Handbook. Springer Series in Reliability Engineering.

Pintelon, L, N. Muchiri P., 2009. Safety and Maintenance. Handbook of Maintenance Management and Engineering. Springer Dordrecht Heidelberg London New York; 2009.p.613-646.

Pierce, J. R., 1980. An Introduction to Information Theory, (Dover, New York, 1980), 2nd edition.

Plot, E., 2004. Guide de la prise en compte du facteur humain dans l'évaluation des systèmes de gestion des risques majeurs. European Safety and Reliability conference, Stavanger, Norvège.

Raouf, A., 2004. Productivity enhancement using safety and maintenance integration: an overview. Int J Syst Cybernet 2004; 33:1116–1126.

Rasmussen, J., 1997. Risk management in a dynamic society: a modelling problem. Safety Science, Volume 27, No. 2/3 (1997): 183-213, doi: 10.1016/S0925-7535(97)00052-0.

Ray, T. S., in Langton, C., Taylor, C., Farmer, J. D., Rasmussen, S., 1991. An approach to the synthesis of life: Artificial Life II, volume XI of Santa Fe Institute Studies in the Sciences of Complexity, pp. 371–408 (Addison-Wesley, Redwood City, CA, 1991).

Ray, P.S., Baston, R.G., Weems, W.H., Wan, Q., Sorock, G.S., Matz, S., Cotnam, J., 2000. Impact of maintenance function on plant safety. Professional Safety, August, 45-48.

Reason, J., 1990. Human Error. New York, NY: Cambridge University Press.

Reason, J., 1997. Managing the Risks of Organisational Accidents, Ashgate.

Refsdal, A.. Stolen, K., 2008. Extending UML Sequence Diagrams to Model Trust Dependent Behaviour with the Aim to Support Risk Analysis. Journal of Electronic Notes in Theoretical Computer Science, Vol. 197, No. 2, pp. 15-29.

Rezki, N., Mouss Layla, H., Kazar, O., 2013. Design of multi-agent system for quality control and machine maintenance". Control, Decision and Information Technologies (CoDIT), International Conference on, Hammamet, pp. 794-797.

Russel, S.J., Norving, P., 2003. Artificial Intelligence. A modern Approach. Prentice Hall, 2003.

Rosness, R., Blakstad, H.C., Forseth, U., Dahle, I.B., Wiig, S., 2012. Environmental conditions for safety work-theoretical foundations. Safety Science, 50, pp. 1967-1976.

Roberts, K. H., 1990. Some characteristics of one type of high reliability organization. Organization Science, 1(no 2), pp. 160-176.

Rogers, R.I., 2000. The RASE project risk assessment of unit operations and equipment, http://www.safetynet.de/.

RSSG (Royal Society Study Group, UK). 1992. Risk Analysis: Perception and Management. Report of the Royal Society Study Group, UK, London 1992, Based on British Standards 4778, 1991.

Sabar, M., 2008. An approach based agent for the planning and scheduling in real time staff in a flexible assembly line context. Laval University, Faculty of Business Administration, Quebec, Canada.

Sacile, R., Poalucci, M., 2004. Agent-Based Manufacturing and Control Systems: New Manufacturing Solutions for Achieving Peak Performance. ISBN 1574443364, p. 288.

Sadgrove, K., 2005. The complete guide to business risk management, 2nd edition, Gower Publishing Limited, England, pp 277-284.

Salge, M., Milling, M. P., 2006. Who is to blame, the operator or the designer? Two stages of human failure in the Chernobyl accident. System Dynamics Review, 22(no 2), 89e112.

Sander, L. M., 2009. Advanced Condensed Matter Physics, (Cambridge University Press, Cambridge, 2009).

Sanders, R. 2005. Maintenance-induced accidents and process piping problems. In Chemical process safety: Learning from case histories (3rd ed.). (pp. 91e123) Elsevier Inc.

Secchi, D., Neumann, M., 2016. Agent-Based Simulation of Organizational Behavior: New Frontiers of Social Science Research. Springer International Publishing Switzerland, 2016. DOI 10.1007/978-3-319-18153-0_1.

Schelling, T., 1971. Dynamic models of segregation, J. Math. Soc.1, 143–186 (1971).

Scott, J., 2000.Social Network Analysis: A Handbook, (Sage, London, 2000), 2nd edition.

Searle, J.R., 1969. Speech acts: An essay in the Philosophy of Language. Cambridge University Press.

Sethna, J. P., 2006. Statistical Mechanics: Entropy, Order Parameters and Complexity, (Oxford University Press, Oxford, 2006).

Simard, M., Marchand, A., 1997. Participation of the Workers in the Prevention of Occupational Accidents: Forms, Efficacy and Determinants, Report R-154, IRSST, Montreal, 1997, p. 40.

Simon, H. A., 1955.On a class of skew distribution functions. Biometrika 42, 425–440 (1955).

Simon, H., 1962. The architecture of complexity. Proceedings of the American Society Phylosophical.1962.

Shannon, C. E., 1948. A mathematical theory of communication, Bell System Technical Journal 27, 379–423 (1948).

Sheard, S., 2006. Complex Systems Science and its Effects on Systems Engineering, European Systems Engineering Conference, Edinburgh, UK, 18-20 September 2006.

Shen, W., Hao, Q., Yoon, H.J, Norrie, D.H., 2006. Applications of agent-based systems in intelligent manufacturing: an updated review. Advanced Engineering Informatics, vol.20, pp. 415-431.

Smith, R.G., 1980. The contract net protocol: high-level communication and control in distributed problem solver. IEEE Transactions on Computers, vol. 29, N°12, pp. 1104-1113.

Smith, J., Maynard, 1993. The Theory of Evolution, (Cambridge University Press, Cambridge, 1993), 3rd edition.

Smith, E. J., and Harris, M. J., 1992. The role of maintenance management deficiencies in major accident causation'. ARCHIVE: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering, 1989e 1996 (vols. 203e210) 206(15), 55-66.

Sheu, C., Krajewski, L., 1994. A decision model for corrective maintenance management", IJPR, vol. 32, no. 6, 1994, pages 1365–1382.

Shield, S.R., 1993. A model to predict the radiant heat transfer and blast hazards from LPG BLEVEs. AIChE Symposium Series, vol. 89.

Solé, R., Goodwin, B., 2002. Signs of Life: How Complexity Pervades Biology, (Basic Books, New York, 2002).

Soulat, J., 1994.Theory of complex systems and financial instability. Universite de Paris I Pantheon-Sorbonne 1994.

Starbuck, W.H., Farjoun, M., 2005. Organization at the Limit. Lessons from the Columbia Disaster. Blackwell Publishing, Oxford.

Sterman, J.D., 2000. Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World with CD-ROM" New York: McGraw-Hill/Irwin.

Strogatz, S. H., 1994.Nonlinear Dynamics and Chaos (AddisonWesley, Reading, MA, 1994).

Strogatz, S. H., 2001. Exploring complex networks. Nature 410, 268–276 (2001).

Swarmfest, 2012. SDG's annual agent-based modeling conference. http://www.swarm.org/index.php/Swarmfest_2012. Archived at http://www.webcitation.org/6QWgWxpcI.

Talib, A. M., Rusli, A., Rodziah, A., Masrah Azrifah, A.M., 2010. MASK-SM: Multi-Agent Based Knowledge Management System to Support Knowledge Sharing of Software Maintenance. Computer and Information Science, Volume 3, N° 2, May 2010, pp. 52-78.

Tisue, S., Wilensky, U., (2004, updated 2013). NetLogo: Design and implementation of a multi-agent modeling environment. In Proceedings of the Agent 2004 Conference on Social Dynamics: Interaction, Reflexivity and Emergence, Chicago, Illinois.

Tixier, J., Dusserre, G., Salvi, O., Gaston, D., 2002. Review of 62 risk analysis methodologies of industrial plants. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 15, pp. 291-303.

Tounsi, J., 2012. A multi-agent knowledge model for SMEs mechatronic supply chains. Journal of Intelligent Manufacturing 23, 2647-2665 (2012) pp. 2647-2665.

Treuil, J.P, Drogoul, A., Zucker, J.D., 2008. Modélisation et simulation à base d'agents: exemples commentés, outils informatiques et questions théoriques. Dunod.

Turing, A. M., 1952. The chemical basis of morphogenesis," Phil. Trans. R. Soc. London B 237 (37-72) (1952).

Vallee, A., Dolladille, O., 2003. Analyse des risques et prévention des accidents majeurs (DRA-34) . Rapport Partiel n°DRA-2003-Ava/ODo-46054-64web.doc: INERIS pour le Ministre de l'Ecologie et du Développement Durable.

Vaughan, D., 1996. The Challenger Launch Decision. The University of Chicago Press, Chicago.

Vautrin, J.P., Edwards, R., Nicolaisen, P., 1992. Robots and automated assembly. Impact of their use on the working conditions within the European commonality, 146, 455-478.

Venkatesh, J., 2007. An introduction to total productive maintenance (TPM) . The plant maintenance resource center, 2007, 3-20.

Veyret, Y., Beucher, S., Reghezza, M., 2004. Les risques. Bréal. ed, Amphi Géographie- Capes/Agrégation. Paris.205p.

Vicsek, T., Czirok, A., Ben-Jacob, E., Cohen, I., Shochet, O., 1995. Novel type of phase transition in a system of self-driven particles, Phys. Rev. Lett. 75, 1226–1229 (1995).

Vinnem, J., Bye, R., Gran, B., Kongsvik, T., Nyheim, O., Okstad, E., 2012. Risk modelling of maintenance work on major process equipment on offshore petroleum installations. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 25(2), 274e292.

Vinnem, J. E., 2012. On the analysis of hydrocarbon leaks in the Norwegian offshore industry. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 25(4), 709e717.

Vinnem, J. E., 2013. On the development of failure models for hydrocarbon leaks during maintenance work in process plants on offshore petroleum installations. Reliability Engineering and System Safety, 113, 112e121.

Wagenaar, W.A., Groeneweg, J., Hudson, P.T.W., Reason, J.T., 1994. Promoting safety in the oil industry. Ergonomics 37 (12), 1999–2013.

Wallace, S., Merritt, C., 2003. Know when to say 'when': a review of safety incidents involving maintenance issues. Process Safety Progress, (4), 212e219.

Wang, H., 2002. A Survey of Maintenance Policies of Deteriorating Systems. European journal of operational research, 139, pp. 469–489.

Wasserman, S., Faust, K., 1994. Social Network Analysis, (Cambridge University Press, Cambridge, 1994).

Watts, D. J., 2003. Six Degrees: The Science of a Connected Age". (Norton, New York, 2003).

Watts, D. J., 2004. The new science of networks, Annual Review of Sociology 30, 243–270.
Watson, J., 2007. Strategy: An Introduction to Game Theory, (Norton, New York, 2007).
Weaver, W., 1948. Science and complexity, in American Scientist, 36: 536-544. 1948
Weber, A., Thomas, I. R., 2005. Key Performance Indicators. Measuring and Managing the Maintenance Function, Ivara Corporation, Burlington Ontario, Canada.
Weiss, G., 1999. Multi-agent Systems: A Modern Approach to Distributed Modern Approach to Artificial Intelligence. Massachusetts Institute of Technology, 1999.
West, G. B., Brown, J. H., Enquist, B. J., 1997. A general model for the origin of allometric scaling laws in biology, Science 276, 122–126 (1997).
West, G. B., Brown, J. H., 2004. Life's universal scaling laws, Physics Today 57 (9), 36–42 (2004).
Wilensky, U., Rand, W., 2015. An introduction to Agent-Based Modeling: Modeling Natural, Social, and Engineered Complex Systems with NetLogo. The Massachusetts Institute of Technology Press. Cambridge, Massachusetts. London, England.
Winfree, A. T., 2000. The Geometry of Biological Time, (Springer, New-York, 2000), 2nd edition.
Wireman, T., 1998. Developing Performance Indicators for Managing Maintenance. New York, Industrial Press, Inc.
Wolfram, S., 2002. A New Kind of Science, (Wolfram Media, Champaign, IL, 2002).
Wooldridge, M., Jennings, N.R., 1995. Intelligent Agents: Theory and Practice. The knowledge Engineering Review, 10(2), pp. 115-152, 1992.
Wooldridge, M., Jennings, N.R., Sycara. B. 1998. A roadmap of agent research and development. Int Journal of Autonomous Agents and Multi-Agent Systems, 1(1):7-38,1998.
Wooldridge, M., Deloach, S.A., 2000. An overview of the multi-agent systems engineering methodology, Agent Software Engineering. Proceedings of the first International Workshop on Agent-Oriented Software Engineering. Lemerick, Irlande, Springer, Verlag, Juin 2000.
Wooldridge, M., 2002. An introduction to Multi-Agent systems. Wiley Ed, 2002.
Yeung, W.L., 2011. Behavioral modelling and verification of multi-agent systems for manufacturing control. Expert Systems with applications, vol 38, pp.13555-13562.
Yuan, J., Ponsignon, T., 2014. Towards a SemiConductor Supply Chain Library (SCSC-SIMLIB). Proceedings of the 2014 Winter simulation Conference. 978-1-4799-7486-3/14/$31.00©2014 IEEE, pp. 2522-2532.
Zeigler, B., Praehofer, H., Kim, T., 2000. Theory of modeling and simulation: Integrating discrete event and continuous complex dynamic systems. Academic Press.
Zgaya, H., 2007. Conception et optimisation distribuée d'un système d'information d'aide à la mobilité urbaine : une approche multi-agents pour la recherche et la composition des services liés au transport. Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lille, 2007.
Zhaoyang, T., Jinfeng, L., Zongzhi, W., Zheng, J., Weifeng, H., 2011. An evaluation of maintenance strategy using based inspection. *Safety Science*, 49, pp. 852-860.
Zhou, R., Fox, B., Lee, H.P., Nee, A.Y.C., 2004. Bus maintenance scheduling using multi-agent systems. Engineering Applications of Artificial Intelligence 17, 623–630.
Zwirn, H.P., 2006. Les systèmes complexes. Mathématiques et biologie, Paris, Editions Odile Jacob.- 219 p.

GLOSSAIRE

Accident : Événement non désiré qui entraîne des dommages vis-à-vis des personnes, des biens ou de l'environnement.

Analyse des risques : Étude qui permet de déterminer le degré de risque et d'évaluer les conséquences directes et indirectes, tangibles et intangibles d'un événement sur une organisation et son environnement.

Barrière : Obstacle physique dont l'objectif est de limiter, retarder ou empêcher la réalisation ou la propagation d'un phénomène dangereux sur l'installation, le personnel, la population et l'environnement.

Complexité : La complexité est une propriété des systèmes, qui rend compte de la difficulté de leur compréhension et de leur maîtrise. Alors qu'un système est dit « compliqué » lorsqu'il possède un nombre important d'éléments qui rendent laborieux sa compréhension totale, un système est dit « complexe » lorsque sa compréhension globale ne permet pas d'en déduire une connaissance assurée de sa dynamique : des phénomènes d'émergence, de changement structurel, de délais affectent ce type de systèmes, pour lesquels l'identification de causalités est un enjeu fort.

Danger : Situation, condition ou pratique qui comporte en elle-même un potentiel à causer des dommages aux personnes, aux biens ou à l'environnement.

Dynamique des systèmes : Méthode de modélisation systémique, proposée par J.W. Forrester au début des années 1960 (*System Dynamics*, en anglais). Cette méthode participe au développement de la modélisation pour la simulation des systèmes naturels, sociaux, techniques et artificiels. Elle met l'accent sur les boucles de rétroaction entre variables d'état, et les délais qui établissent des relations non linéaires entre éléments d'un système. C'est une modélisation dite « agrégée », qui aborde un système à son niveau le plus général et désagrège les relations selon le principe de la démarche descendante.

Environnement du système : Un système est un ensemble d'éléments qui possèdent des interactions relativement fortes ou sensibles. D'autres éléments, relativement, agissent sur ces éléments du système ou en subissent des actions sans agir en retour. Ces éléments forment l'environnement du système, qui possède ainsi une frontière. En modélisation systémique, il est primordial de définir le système et son environnement, afin de constituer le domaine de connaissance et d'expertise adapté. Voir *Frontière*.

Facteur humain : Un système de production (ou de services) est conçu comme étant un ensemble d'éléments en interaction où, parmi ces éléments, l'homme est un composant ou un facteur constitutif. Il convient donc de rechercher les origines des défaillances de l'homme telles que la fatigue, le stress, le manque de compétence…Ces éléments représentent ainsi les facteurs humains.

Facteur organisationnel : La survenue d'un accident est généralement provoquée par l'interaction entre le ou les opérateurs et l'ensemble des composants de la situation de travail. Un facteur organisationnel représente ainsi un ensemble d'éléments qui participent à l'organisation du travail et à son déroulement (interface homme-machine ; définition des tâches et des horaires de travail etc.)

Facteur technique : Les facteurs techniques sont l'ensemble de causes techniques d'un incident ou d'un accident (rupture d'un composant, usure prématurée, court-circuit etc.).

Gestion des risques : Ensemble des activités qui consistent à recenser les risques auxquels l'entité est exposée, les évaluer, puis à définir et à mettre en place les mesures préventives appropriées en vue de supprimer ou d'atténuer les conséquences d'un risque couru et enfin de communiquer sur ces risques et les mesures associées.

Incident : Événement fortuit et imprévisible, qui survient et modifie le déroulement attendu et normal des choses en provoquant une interruption ressentie le plus souvent comme fâcheuse mais sans gravité particulière pour le personnel, l'installation ou l'environnement.

Modélisation : Activité de représentation d'un système selon des concepts, méthodes et outils qui assurent l'explicitation des choix de cette représentation, et définit les hypothèses concernant les phénomènes qui agissent dans le système : structure, causalité, dynamique, évolution. Le choix des variables qui expriment l'état d'un système à chaque instant est au cœur de l'expression d'un système par un modèle.

Risque: Mesure d'un danger associant une mesure de l'occurrence d'un événement indésirable et une mesure de ses effets ou conséquences. Confrontation d'un aléa (événement indésirable) avec un enjeu (personnes, environnement, infrastructures etc.).

Scénario : Conditions établies pour une simulation, comme les valeurs initiales des variables d'état, les valeurs de certains paramètres, des changements de ces valeurs durant la simulation, afin d'exprimer une situation particulière du système dynamique dans le temps ou dans ses relations avec son environnement. Les scénarios permettent d'évaluer la dynamique du système, sa capacité à être stable ou instable selon différentes conditions. Définir plusieurs scénarios pour un même système permet, selon les résultats des simulations associées, d'avoir une connaissance améliorée du système et mieux saisir les phénomènes contre-intuitifs qui peuvent être présents dans sa dynamique.

Sécurité : La sécurité est l'aptitude d'une entité à éviter de faire apparaître des événements critiques. Elle se mesure par la probabilité que l'entité E évite de faire apparaître des événements catastrophiques. Son contraire est l'insécurité.

Simulation : Une simulation est le résultat d'un ensemble de calculs établis par un programme computationnel, écrit dans un langage informatique qui traduit les relations entre éléments d'un système selon des règles logico-mathématiques. Les résultats numériques, attribués aux variables qui décrivent les éléments du système, peuvent être représentés sous la forme de courbes temporelles, de tableaux de valeurs, d'animations graphiques pour faciliter leur compréhension. Les différents scénarios pour un même modèle de simulation produisent *a priori* des résultats différents. Si différents scénarios restituent des résultats équivalents à travers des simulations, cela signifie que le système est stable. La simulation permet de restituer à une personne non spécialiste de la modélisation une connaissance qualitative (type de comportement dynamique) et quantitative (valeurs des variables) du système, ce qui lui donne un caractère heuristique fort.

Système : Un système est un ensemble d'éléments en interaction, dont les relations de causalité sont identifiées comme plus intenses ou rétroactives qu'avec les éléments de son environnement.

Systémique : La systémique est une démarche qui propose de construire et de formaliser la connaissance scientifique sous la forme de systèmes, dont la représentation et l'étude s'élaborent par la modélisation. Elle a pour ambition de dépasser les limites de la démarche analytique. Elle privilégie la relation, la dynamique et le niveau global.

ANNEXE

ANNEXE A : Scénarios de Défaillance

Présente un tableau qui contient une liste des scénarios de défaillance de chaque équipement que nous avons pu estimer possibles de survenir. Pour chaque équipement nous avons défini également les types de maintenance, toutes les interventions de maintenance que peuvent être réalisées, ainsi que les événements redoutés et leurs conséquences.

ANNEXE B : Code et Variables de la Simulation AnyLogic

Présente un tableau contenant les variables et codes utilisés et définis dans chaque agent simulé dans la plateforme AnyLogic avec le type et la description de ces variables.

ANNEXE C : Justification de choix des scénarios de défaillance par l'industrie

Présente l'Email reçu qui montre le choix de l'industrie à des scénarios de défaillance les plus significatifs et ayant un intérêt pour le service maintenance.

TABLEAU A. LISTE DES SCÉNARIOS DE DÉFAILLANCE LIÉE A CHAQUE ÉQUIPEMENT AVEC LES INTERVENTIONS DE MAINTENANCE.

Equipements	Type maintenance	Intervention	Scénarios de défaillance	Evénement Redouté	Conséquences
Bras (liquide/ Gaz)	- Contrôle - Echange	- Contrôle visuel de la peinture, - Vérification des départs de corrosion et l'aspect général, - vérification de la structure du bras(déformation importante des tubes, de l'équilibrage). - Vérification de la présence goupille ou écrou ; - Test de manœuvrabilité - Réglage équilibrage ; - Graissage complet de l'équilibrage ; - Vérification présence graisseur ; - Test de manœuvrabilité; - Graissage du joint tournant ; - Vérification de l'étanchéité. - Contrôle de fuite sur sphère ; - Contrôle de fuite sur la presse étoupe ; - Fermeture complète avec verrouillage ; - Lubrification targette. - Fonction homme mort ; - Lubrification ; - Réglage de la butée ; - Test de manœuvrabilité du vérin ; - Etat de flexible ; - Fixation du flexible sur le bras ;	- Manque d'attention lors d'une opération de raccordement de bras de chargement de camion et de l'ouverture de la vanne manuelle. - Non déconnexion des bras avant vidange et rupture soudaine de la connexion camion bras de chargement. - Débranchement intempestif dû au non changement du filetage de l'écrou du bras usé. - Non réalisation du contrôle annuel de l'usure de filetage de l'écrou du bras ; - Mauvais serrage et branchement du raccordement du bras ; - Autorisation de déchargement lors d'un arrêt programmé de la maintenance qui mène à désaccordé le raccordement du bras liquide ; - Mauvaise vidange et non inertie des bras. - Non fermeture des vannes de bras lors de la maintenance ; - Blocage des vannes de bras et non vérification de sens de fermeture ; - Non mise des EPI lors du travail sur les vannes ouvertes du bras ; - Court circuit lors de vérification du bon	- Arrachement de bras ; - Fuite sur bras.	- Echappement du propane liquide du bras ; - Brûlure ; - Rejet de gaz à l'atmosphère.

		- Date de fabrication du flexible ; - Prévoir le remplacement. - Etat du galet ; - Test alarme si alarme déconnecté sans la terre ; - Etat des tresses ; - Valeur de la continuité électrique mesurée.	état des tresses sans prendre en mesure la continuité électrique du bras. - Manque de graisse dans les parties en frottement ; - Utilisation d'un lubrifiant mal adapté ou salé ; - Desserrage des écrous ou de raccordement du bras ;		
Pompes	Contrôle visuel	- Remplacement des joints. - Contrôle visuel de la peinture. - Démontage/Montage des pièces. - Réglage de la garniture mécanique. - Dégazage de la garniture. - Graissage modéré. - Test du bon fonctionnement du clapet anti-retour à recirculation. Une vanne est fermée en aval de la pompe et on vérifie que cela entraîne la recirculation au débit minimal admissible.	- Erreur lors d'une opération de jointage. - Changement de joint de la pompe avec un joint électrique inadéquat sans vérification sur une pompe. - Blocage de clapet cessant la recirculation du fluide. La cessation de la recirculation de fluide ne permet plus le maintien de débit minimum ce qui engendre la dégradation de la pompe. - Non remplacement des joints usés. - Dépannage de la pompe par une garniture fuyarde. - Mauvais alignement de la tuyauterie provoquant une usure prématurée des roulements ou des coussinets de la pompe. - Mauvais réglage de la garniture mécanique : non fixation de la chemise de la garniture sur l'arbre. - Oubli de dégazer la garniture lors de sa réparation.	- Fuite d'un joint de pompe ; - Fuite de brides ; - Fuite sur pompe. - Fuite de garniture.	- Explosion vapeur ; - Mort ;

			- Graissage abusif provoquant un échauffement rapide des roulements. - Serrage abusif des garnitures engendrant une fuite. - Coupure du joint torique de la chemise de garniture lors du remontage de la garniture à cause de non protection du filetage de l'arbre. - Non intégration de la pompe dans le plan de maintenance. - Remplacement de la pompe par un opérateur non formé ou non expérimenté. - Non mise en place d'un point de purge permettant de réduire les risques de présence de gaz dans le corps de la pompe. - Oubli des règles d'implantation des pompes.		
Compresseurs	Contrôle visuel global	- Vérification de la pression et le niveau d'huile du carter. - Vérification de la pression de refoulement du compresseur. - Drainage de liquide de points d'accumulation. - Nettoyage des surfaces de compresseur. - Vérification des corrois de tension s'elles sont correctes. - Inspection de l'ensemble des soupapes. - lubrification des roulements	- Mise en route d'un compresseur gaz avec les vannes d'isolement fermées ce qui mène à la dégradation du compresseur (Oubli d'ouverture des vannes d'isolement lors de la mise en route du compresseur). - Consignes sur l'isolement du compresseur non écrites (consigne passée verbalement aux exploitants), et la mise en marche du compresseur par l'ERV qui n'a pas eu la consigne de l'isolement.	Ruine du compresseur	- Chauffe du compresseur. - Surpression du compresseur. - Surchauffe.

		du moteur conformément aux «recommandations du fabricant ». - Inspection des bagues de piston. - Inspection des points de contact de démarrage du moteur.	- Absence de traçabilité de la consignation du compresseur. - Absence de dispositif technique en amont des vannes d'isolement. - Mauvais nettoyage ou non remplacement d'une soupape usée/détériorée. - Mauvais roulement du moteur dû à la non suivi des instructions du fabriquant lors de lubrification.		
Détecteurs de Gaz et Flamme	Inspection visuelle	- Vérification de l'absence d'obstacle qui puisse empêcher ou ralentir la détection. - Vérification de l'état des détecteurs (corrosion, oxydation, humidité, poussiéreux). - Nettoyage des détecteurs.	- Mauvais nettoyage de détecteur engendrant une alarme intempestive. - Mauvais étalonnage des détecteurs. - Non suivi des instructions du fabriquant pour assurer l'étalonnage. - Non suivie des consignes de sécurité lorsqu'un détecteur gaz est inhibé. - Non vérification des seuils de déclenchement préalarme/alarme.		
	Contrôle	- Resserrage borne et presse étoupe. - Vérification de serrage du raccordement. - Vérification du joint d'étanchéité si équipé et procéder à son remplacement si nécessaire. - Test de déclenchement de l'alarme avec la lampe test. - Vérification de l'étalonnage à			

		l'aide d'une bouteille de gaz.			
	Intervention	- Vérification de la position capteurs ; - Vérification de l'alimentation secourue ; - Vérification du câblage électrique ; - Vérification conformité câbles capteurs ; - Vérification des « Zéro » capteurs ; - Vérification des seuils d'alarme ; - Vérification des asservissements ; - Vérification du réseau pneumatique ; - Vérification des débits ; - Vérification des « Grain » capteurs ; - Vérification de la programmation ; - Vérification des filtres ; - Vérification des N° de série.			

TABLEAU B. DESCRIPTION DES VARIABLES DÉFINIES DANS CHAQUE AGENT.

Agent	Variables	Type	Description
BrasDechargDecharg	diamètreBrasGaz	Parameter	Contient le diamètre de bras Gaz qui égale 0.058m
	DiamètreBrasLiq	Parameter	Contient le diamètre de bras Liquide qui égale 0.058m
	parameter	Parameter	Représente l'air de la section égale à `PI*sqrt(diamètreBrasGaz/2)`
	Parameter1	Parameter	Vitesse de fluide dans le bras égale à `(main.unloadingFlow)/parameter`
	SeverityArm	Parameter	Présente la gravité des défaillances de maintenances liées au bras
	DetectArm	Parameter	Présente la valeur de détectabilité des défaillances de maintenance de bras
	ProbArm	Variable	La probabilité d'occurrence des défaillances de maintenance de Bras. La variable suit une distribution PERT
	CriticlityArm	Dynamic Variable	Calcule la criticité de Bras selon les trois paramètres : `SeverityArm*DetectArm*ProbArm`
	C3	Parameter	Un paramètre facilite le calcul de temps de bon fonctionnement : - C3 = 1 : si le bras est dans un état de fonctionnement ; - C3 = 0 : si le bras a un problème.
	C4	Parameter	Un paramètre permettant le changement d'état : Si l'état problème donc C4=1, et dans ce cas la MTBF va être calculé.
	C5	Parameter	Un paramètre qui montre le changement d'état : Si l'état maintenance, donc C5=1, et dans ce cas la MTTR va être calculé.
	prevUpTimeSum	Parameter	Temps Total de fonctionnement de l'équipement.
	prevUpTime	Parameter	L'instant où l'équipement passe vers l'état fonctionnel
	TimeToRepair	Parameter	Le temps que prend l'équipement pour sa réparation, c'est le temps où l'équipement est dans l'état (stoppedForMaintenance): `TimeToRepair = time()`
	nbrFailures	Parameter	Le nombre de défaillance que l'équipement subit
	UpTimeSum	Dynamic Variable	Temps passé par l'équipement dans un état de bon fonctionnement : `prevUpTimeSum + C3*(time-prevUpTime)`
	Time	Dynamic Variable	Prend la fonction time ()
	MTBF	Dynamic Variable	Calcule l'indicateur de MTBF qui est égale à : `C4*upTimeSum /(nbrFailures + 0.000000001)`

	SumTimeToRepair	Dynamic Variable	Calcule le temps total consacré à la réparation : `TimeToRepair + C5*(time - TimeToRepair)`
	MTTR	Dynamic Variable	Calcule l'indicateur MTTR qui est égale : `SumTimeToRepair/(nbrFailures+0.000000001)`
	Availability	Dynamic Variable	Calcule la disponibilité de l'équipement : `MTBF/(MTBF + MTTR + 0.000000001)`
	FailureRate	Dynamic Variable	Calcule le taux de défaillance de l'équipement : `1/ ( MTBF + 0.000000001)`
	Fail	Button	Un bouton qui mène à l'état problème : `send("Failure", this);`
	Maintenance	Button	Un bouton qui mène à l'état maintenance: `send("maintenance", this);`
	fixed	Button	Un bouton qui mène à l'état fonctionnel : `send("Repaired", this);`
	enterOp	Process Modeling Library	Lors d'un problème qui nécessite une maintenance, un message est envoyé à l'opérateur disant que l'équipement Bras nécessite une intervention : `send("maint", agent);` `send ("maint",this);` `agent.nameOfTheEquipment ="BrasDeChargDécharg";` `installationsTechniques.sendOpForMaintenance.restart()`
	Statechart_BL	Statechart	Représente l'état de connexion du bras liquide avec le camion : soit non connecté au camion (notConnected), soit connecté qui comprend des sous états : - wellConnected : bien connecté avec le camion ; - problem : un problème de connexion.
	Statechart_BL1	Statechart	Représente deux états : - Bras liquide est vide (BL_isEmpty) ; - Bras liquide contenant de GPL (BL_containGPL).
	Statechart_BL2	Statechart	Représente l'état du bras liquide s'il est en bonne condition (BL_isInGoodCondition), dans une mauvaise condition (BL_isInBadCondition), ou arrêter pour une intervention de maintenance (StoppedForMaintenance).
	statechartValveBL	Statechart	Représente l'état de la vanne de bras liquide si elle est ouverte (BLvalve_isOpen) ou fermée (BLvalve_isClosed).
	Statechart	Statechart	Représente l'état de connexion du bras Gaz avec le camion : soit non connecté au camion (notConnected), soit connecté qui comprend des sous états :

			- wellConnected : bien connecté avec le camion ; - problemBG: un problème de connexion.
	Statechart_BG1	Statechart	Représente deux états : - Bras gaz est vide (BG_isEmpty) ; - Bras gaz contenant de GPL (BG_containGPL).
	Statechart_BG2	Statechart	Représente l'état du bras gaz s'il est en bonne condition (BG_isInGoodCondition), dans une mauvaise condition (BG_isInBadCondition), ou arrêter pour une intervention de maintenance (StoppedForMaintenance)..
	statechartValveBG	Statechart	Représente l'état de la vanne de bras gaz si elle est ouverte (BGvalve_isOpen) ou fermée (BGvalve_isClosed).
	feBL	Fluid Library	Représente la transmission (chargement/déchargement) du fluide dans le bras liquide dans la canalisation contenant une vanne pour contrôler l'ouverture ou la fermeture du fluide.
	feBG	Fluid Library	Représente la transmission (déchargement) du fluide dans le bras gaz dans la canalisation contenant une vanne pour contrôler l'ouverture ou la fermeture du fluide.
	fluidEnter	Fluid Library	Représente le transfert de Gaz/Liquide de Bras vers le réservoir
	mFlowRateBG	Dynamic Variable	Représente la masse de débit de Gaz qui entre dans le bras : `installationsTechniques.compresseur. mFlowRateComp`
Compresseur	valve	Statechart	Représente l'ouverture de la vanne 4 voies : - open1 : refoulement - open2 : aspiration
	comprSC	Statechart	Représente les états du compresseur : - Functional : le compresseur est dans un état de fonctionnement, soit il marche (working), soit il est arrêté (stopped) ; - Problem : une défaillance de maintenance ; - stoppedForMaintenance : le compresseur est arrêté pour une intervention de maintenance.
	fluidEnter	Fluid Library	Représente la transmission du fluide de bras au compresseur et de compresseur au réservoir ; ou le fluide revient de compresseur au bras.
	fluidEnter1	Fluid Library	Représente la transmission du fluide de réservoir au compresseur et de bras au compresseur.
	enterOp	Process Modeling Library	Lors d'un problème qui nécessite une maintenance, un message est envoyé à l'opérateur disant que l'équipement Bras nécessite une intervention :

			`send("maintenance", agent);` `send("maintenance", this);` `agent.nameOfTheEquipment = "Compresseur";` `installationsTechniques.sendOpForMaintenance.restart();`
	setFlowFromTankToRSTfunction	Function	Fonction qui permet le découlement de Gaz lors de refoulement.
	setFlowFromRSTtoTankFunction	Function	Fonction qui permet le découlement de liquide lors de l'aspiration.
	vFlowRateComp	Parameter	Représente le débit de compresseur qui est égale 110m³/h
	currentVFlowRateComp	Dynamic Variable	Le débit volumique du compresseur égale à : `C*vFlowRateComp`
	C	Parameter	Coefficient permettant d'avoir soit un débit volumique ou non dans la canalisation
	mFlowRateComp	Dynamic Variable	La masse de butane qui débite dans le compresseur calculée par la l'équation des gaz parfaits (P*V*M/RT): `(M_butane*(pressionEntrée*currentVFlowRateComp)/(R*temperature_K))*0.001`
	mFlowRateComp1	Dynamic Variable	La masse volumique de butane qui débite dans le compresseur calculée par la l'équation des gaz parfaits (P*V*M/RT): `(M_butane*(pressionEntrée*vFlowRateComp)/(R*temperature_K))*0.001`
	R	Parameter	Représente la constante des gaz parfaits qui est égale à 8.314
	Temperature_C	Parameter	Représente la température à ne pas dépasser dans le compresseur 25°C
	Temperature_K	Dynamic Variable	Représente la température Kelvin égale à `273.5+temperature_C`
	M_butane	Parameter	La masse molaire du butane égale à 4*12+10
	C1	Parameter	Le coefficient pour changer l'état de la pression (RST pression)
	C2	Parameter	Le coefficient pour changer l'état de la pression (CiternePression)
	SeverityComp	Parameter	Présente la gravité des défaillances de maintenances liées au compresseur
	DetectComp	Parameter	Présente la valeur de détectabilité des défaillances de maintenance de compresseur
	ProbaComp	Variable	La probabilité d'occurrence des défaillances de maintenance de compresseur. La variable suit une distribution PERT
	CriticlityComp	Dynamic Variable	Calcule la criticité de Compresseur selon les trois paramètres : `SeverityComp*DetectComp*ProbaComp`
	C3	Parameter	Un paramètre facilite le calcul de temps de bon fonctionnement : - C3 = 1 : si le bras est dans un état de fonctionnement ; - C3 = 0 : si le bras a un problème.

	C4	Parameter	Un paramètre permettant le changement d'état : Si l'état problème donc C4=1, et dans ce cas la MTBF va être calculé.
	C5	Parameter	Un paramètre qui montre le changement d'état : Si l'état maintenance, donc C5=1, et dans ce cas la MTTR va être calculé.
	prevUpTimeSum	Parameter	Temps Total de fonctionnement de l'équipement.
	prevUpTime	Parameter	L'instant où l'équipement passe vers l'état fonctionnel
	TimeToRepair	Parameter	Le temps que prend l'équipement pour sa réparation, c'est le temps où l'équipement est dans l'état (stoppedForMaintenance): `TimeToRepair = time()`
	nbrFailures	Parameter	Le nombre de défaillance que l'équipement subit
	UpTimeSum	Dynamic Variable	Temps passé par l'équipement dans un état de bon fonctionnement : `prevUpTimeSum + C3*(time-prevUpTime)`
	Time	Dynamic Variable	Prend la fonction time ()
	MTBF	Dynamic Variable	Calcule l'indicateur de MTBF qui est égale à : `C4*upTimeSum /(nbrFailures + 0.000000001)`
	SumTimeToRepair	Dynamic Variable	Calcule le temps total consacré à la réparation : `TimeToRepair + C5*(time - TimeToRepair)`
	MTTR	Dynamic Variable	Calcule l'indicateur MTTR qui est égale : `SumTimeToRepair/(nbrFailures+0.000000001)`
	Availability	Dynamic Variable	Calcule la disponibilité de l'équipement : `MTBF/(MTBF + MTTR + 0.000000001)`
	FailureRate	Dynamic Variable	Calcule le taux de défaillance de l'équipement : `1/ ( MTBF + 0.000000001)`
	Fail	Button	Un bouton qui mène à l'état problème : `send("Failure", this);`
	Maintenance	Button	Un bouton qui mène à l'état maintenance: `send("maintenance", this);`
	fixed	Button	Un bouton qui mène à l'état fonctionnel : `send("Repaired", this);`
	pressionEntrée	Dynamic Variable	Calcule la pression entrée dans le compresseur: `C1*RSTpression+C2*citernPression`
Pump	flowRatePump	Parameter	Représente le débit de la pompe 50m³/h
	diamètreCanalisatio	Parameter	Représente le diamètre de canalisation depuis le réservoir vers les pompes égale à

	n		4pouces équivaut à `0.1016m`.
	sectionCanalisation	Parameter	Représente la section de la canalisation égale à : `PI*(diamètreCanalisation/2)*(diamètreCanalisation/2)`
	speedInCanalisation	Parameter	Représente la vitesse de fluide dans la canalisation égale à : `flowRatePump/sectionCanalisation`
	pumpSC	Statechart	Représente les états de la pompe : - Functional : la pompe est dans un état de fonctionnement, soit elle marche (working), soit elle est arrêtée (stopped) ; - Problem : une défaillance de maintenance ; - stoppedForMaintenance : la pompe est arrêtée pour une intervention de maintenance.
	fluidEnter	Fluid Library	Représente la transmission du fluide de réservoir vers la pompe
	SeverityPump	Parameter	Présente la gravité des défaillances de maintenances liées à la pompe
	DetectPump	Parameter	Présente la valeur de détectabilité des défaillances de maintenance de la pompe
	ProbaPump	Variable	La probabilité d'occurrence des défaillances de maintenance de la pompe. La variable suit une distribution PERT
	CriticlityPump	Dynamic Variable	Calcule la criticité de la pompe selon les trois paramètres : `SeverityPump*DetectPump*ProbaPump`
	C3	Parameter	Un paramètre facilite le calcul de temps de bon fonctionnement : - C3 = 1 : si le bras est dans un état de fonctionnement ; - C3 = 0 : si le bras a un problème.
	C4	Parameter	Un paramètre permettant le changement d'état : Si l'état problème donc C4=1, et dans ce cas la MTBF va être calculé.
	C5	Parameter	Un paramètre qui montre le changement d'état : Si l'état maintenance, donc C5=1, et dans ce cas la MTTR va être calculé.
	prevUpTimeSum	Parameter	Temps Total de fonctionnement de l'équipement.
	prevUpTime	Parameter	L'instant où l'équipement passe vers l'état fonctionnel
	TimeToRepair	Parameter	Le temps que prend l'équipement pour sa réparation, c'est le temps où l'équipement est dans l'état (stoppedForMaintenance): `TimeToRepair = time()`
	nbrFailures	Parameter	Le nombre de défaillance que l'équipement subit
	UpTimeSum	Dynamic Variable	Temps passé par l'équipement dans un état de bon fonctionnement : `prevUpTimeSum + C3*(time-prevUpTime)`
	Time	Dynamic Variable	Prend la fonction time ()

	MTBF	Dynamic Variable	Calcule l'indicateur de MTBF qui est égale à : `C4*upTimeSum /(nbrFailures + 0.000000001)`
	SumTimeToRepair	Dynamic Variable	Calcule le temps total consacré à la réparation : `TimeToRepair + C5*(time - TimeToRepair)`
	MTTR	Dynamic Variable	Calcule l'indicateur MTTR qui est égale : `SumTimeToRepair/(nbrFailures+0.000000001)`
	Availability	Dynamic Variable	Calcule la disponibilité de l'équipement : `MTBF/(MTBF + MTTR + 0.000000001)`
	FailureRate	Dynamic Variable	Calcule le taux de défaillance de l'équipement : `1/ ( MTBF + 0.000000001)`
	Fail	Button	Un bouton qui mène à l'état problème : `send("Failure", this);`
	Maintenance	Button	Un bouton qui mène à l'état maintenance: `send("maintenance", this);`
	fixed	Button	Un bouton qui mène à l'état fonctionnel : `send("Repaired", this);`
	enterOp	Process Modeling Library	Lors d'un problème qui nécessite une maintenance, un message est envoyé à l'opérateur disant que l'équipement Pump nécessite une intervention : `send("maintenance", agent);` `send ("maintenance",this);` `agent.nameOfTheEquipment ="pump";` `installationsTechniques.sendOpForMaintenance.restart()`
	Statechart	Statechart	Rend visible au flashing lors d'un problème au niveau de la pompe.
RéservoirSous Talus	diamètreCanalisatio nL	Parameter	Représente le diamètre de canalisation depuis le réservoir vers les pompes égale à 4pouces équivaut à `0.1016m`.
	sectionCL	Parameter	Représente la section de la canalisation égale à : `PI*(diamètreCanalisationL/2)*(diamètreCanalisationL/2)`
	speedInCLin	Parameter	Représente la vitesse de fluide dans la canalisation entrante égale à: `(main.unloadingFlow)/sectionCL`
	flowRatePump	Parameter	Représente le débit de la pompe 50m³/h
	speedInCLout	Parameter	Représente la vitesse de fluide dans la canalisation en sortant : `flowRatePump/sectionCL`
	pressureEqu	Parameter	Pression de la canalisation
	mVbutane	Parameter	Masse volumique de butane égale à 0.6011

	initialVolume	Parameter	Le volume initial de Réservoir RST égale à 200
	fluidEnter	Fluid Library	Représente la transmission de liquide.
	RSTcapacity	Parameter	Représente la capacité de RST qui est égale à 400m³
	Temperature_C	Parameter	Représente la température à ne pas dépasser dans le RST 25°C
	Temperaature_K	Dynamic Variable	Représente la température Kelvin égale à `273.5+temperature_C`
	R	Parameter	Représente la constante des gaz parfaits qui est égale à 8.314
	M_butane	Parameter	La masse molaire du butane égale à `4*12+10`
	pressure	Dynamic Variable	Calcule le volume de pression de RST: `((RSTphaseGazeuse.amount()*1000)/M_butane)*R*temperature_K/gazVolume`
	InitialGazAmount	Dynamic Variable	La quantité initiale de gaz au sein de réservoir RST : `(M_butane*pressureEqu*gazVolume)/(R*temperature_K)`
	SCvalve2	Statechart	Il permet l'ouverture et la fermeture de la vanne liée au RST.
	reequilibrageTerminé	Event	Calcule le rééquilibrage de pression à l'intérieur de réservoir selon la condition suivante : `(fluidDispose.currentRate()!=0||fluidDispose1.currentRate()!=0) && (pressure>= 0.99*pressureEqu && pressure<=1.01*pressureEqu)`
	reequilibragePression	Function	Il assure le rééquilibrage de pression à l'intérieur de réservoir.
	gazEnter	Fluid Library	Représente la transmission de gaz.
PosteDeChargDécharg	selectOp	Actionchart	Représente la sélection d'un opérateur qui doit être disponible.
	newTruck	Button	Injecter un nouveau camion.
	newTruck	FlowChart	Simule l'entrée d'un nouveau camion qui doit être identifié et se positionner dans le poste de chargement/déchargement.
	enterOperator	FlowChart	Simule l'entrée d'un opérateur qui doit être identifié avec un ID, il doit avoir une permission de chargement, vérifie la conformité de la citerne et le respect des quotas, et il délivre une autorisation de chargement au chauffeur.
	enterDriver	FlowChart	Représente les différentes opérations de chargement/déchargement que le chauffeur doit suivre.
	Statechart_PCD	Statechart	Représente les états de camion dans le poste de Chargement/déchargement: - noTrucks : aucun camion dans le poste ; - usedForLoading : l'état de camion pour le chargement ; - usedForUnloading : l'état de camion pour le déchargement.
	Statechart_DCMT	Statechart	Représente l'état de DCMT (Dispositif de Contrôle de Mise à la Terre) : - notConnectedToTruck : non connecté au camion ;

			- connectedToTruck : DCMT connecté au camion.
	Statechart_CISC	Statechart	Représente l'état de CISC (Coupleur Intelligent Sécurité Camion) : - notConnectedToTruck1 : non connecté au camion ; - connectedToTruck1 : CISC connecté au camion.
	initialAmount	Parameter	Quantité initial de la citerne de camion
	Poste1	Rectangle	Représente l'emplacement du poste avec la localisation du camion.
Operator	Statechart	Statechart	Représente trois états de l'opérateur : - Available : Opérateur disponible ; - checkingTruck: Opérateur vérifie l'état de camion. - Maintenance : Opérateur intervient pour une maintenance
	nameOfTheEquipment	Variable	Cette variable montre à l'opérateur l'emplacement de problème, c'est-à-dire le nom de l'équipement sur lequel il va intervenir.
	OperatingTime	Dynamic Variable	Le temps de fonctionnement de l'opérateur égale à : `prevOperatingTimeSum + C*(openingTime - prevOpTime)`
	openingTime	Dynamic Variable	Le temps total de travail égale à : `time()`
	C	Parameter	Coefficient permettant le changement d'état : - C=0 : available ; - C=1 : sinon.
	prevOperatingTimeSum	Parameter	Le temps total de fonctionnement des opérateurs.
	prevOpTime	Parameter	L'instant où l'opérateur commence son intervention.
	UtilisationRate	Dynamic Variable	Indicateur qui montre le taux d'utilisation égale à : `OperatingTime /(openingTime + 0.0000001)`
Driver	driverID	Parameter	Représente le ID de chauffeur, a comme valeur par défaut « OK »
	permissionToLoad	Parameter	Représente la permission de chargement, a comme valeur par défaut « Yes »
	billOfLoading	Parameter	Représente l'autorisation de chargement qui doit l'avoir auprès de 'opérateur, a comme valeur par défaut « NO»
Truck	truckCapacity	Parameter	La capacité de camion égale à 20
	gazVolume	Dynamic Variable	Le volume de gaz au camion qui est égale : `truckCapacity-liqVolume.amount()`

	temperature_C	Parameter	Représente la température à ne pas dépasser dans le RST 25°C
	temperature_K	Parameter	Représente la température Kelvin égale à `273.5+temperature_C`
	M_butane	Parameter	La masse molaire du butane égale à `4*12+10`
	R	Parameter	Représente la constante des gaz parfaits qui est égale à 8.314
	pressure	Dynamic Variable	Calcule le volume de pression de camion: `((gazAmount.amount()*1000)/M_butane)*R*temperature_K/gazVolume`
	dynamicVariable1	Dynamic Variable	Pression globale : `pressure/main.installationsTechniques.réservoirSousTalus.pressure`
	dynamicVariable	Dynamic Variable	Calcule le volume de liquide à l'intérieur de la citerne: `(liqVolume.amount()/truckCapacity)*rectangle4.getHeight()`
	fluidEnter	Fluid Library	Transmission de liquide
	fluidEnter1	Fluid Library	Transmission de gaz
	stopDegazage	Event	Permet l'arrêt de dégazage après une certaine valeur de pression
	rateValve1	Event	Le taux que la pression de la vanne qu'il doit avoir
	pressureBalanced	Event	La pression d'équilibre à avoir
	Statechart	Statechart	Représente les états de l'emplacement de camion : - outOfLoadingStation : le camion ne se trouve pas dans la zone de chargement ; - atLoadingStation : le camion se trouve dans la zone de chargement et doit suivre les consignes d'identification. - Problem : s'il y a un problème lié au camion : soit la non-conformité de la citerne, ou la non identification de chauffeur, etc…
	Statechart_Citerne	Statechart	Représente les états de la citerne: - citern_isConform : la citerne est conforme ; - citern_isNotConform : la citerne est non conforme.
	Statechart1	statechart	Représente les états de véhicule : - Véhicule non calé ; - Véhicule calé.
	Statechart_Truck	Statechart	Représente les états de la conformité de camion: - truck_isConform1 : le camion n'est pas conforme ; - truck_isNotConform1 : le camion est conforme .
Installations Techniques	flowRatePump	Parameter	Représente le débit de la pompe 50m³/h
	diamètreCanalisatio	Parameter	Représente le diamètre de canalisation depuis le réservoir vers les pompes égale à

	nL		4pouces équivaut à `0.1016m.`
	sectionCanalisationL	Parameter	Représente la section de canalisation : `PI*(diamètreCanalisationL/2)*(diamètreCanalisationL/2)`
	statechartGS	statechart	Représente les états de détecteur: - Working : le système globale est dans un état de fonctionnement ; - Failed : une défaillance de maintenance ; - Maintenance SG : le système est arrêté pour une intervention de maintenance.
	Getindex	Actionchart	Suivi des équipements défectueux
	Getindex2	Actionchart	Suivi des équipements en cours de maintenance
	selectOp	Actionchart	Affecte un opérateur disponible à l'équipement défectueux
	sendOpForMaintenance	Event	Envoie l'opérateur vers l'équipement où il y a un problème ; `if ((équipementDéfectueux.get(0).equals("pump"))&&(pump.maintenance.size()==0)) {pump.enterOp.take(selectOp());}` `if ((équipementDéfectueux.get(0).equals("brasDeChargDécharg"))&&(brasDeChargDécharg.maintenance.size()==0)) {brasDeChargDécharg.enterOp.take(selectOp());}` `else if ((équipementDéfectueux.get(0).equals("compresseur"))&&(compresseur.maintenance.size()==0)) {compresseur.enterOp.take(selectOp());}`
	équipementDéfectueux	Collection	Liste les équipements défectueux
	équipementEnCoursDeMaintenance	Collection	Liste les équipements en cours de maintenance
	C6	Parameter	Un paramètre facilite le calcul de temps de bon fonctionnement : - C6 = 1 : si le bras est dans un état de fonctionnement ; - C6 = 0 : si le bras a un problème.
	C7	Parameter	Un paramètre permettant le changement d'état : Si l'état problème donc C7=1, et dans ce cas la MTBF va être calculé.
	C8	Parameter	Un paramètre qui montre le changement d'état : Si l'état maintenance, donc C8=1, et dans ce cas la MTTR va être calculé.
	prevUpTimeSum1	Parameter	Temps Total de fonctionnement de l'équipement.

	prevUpTime1	Parameter	L'instant où l'équipement passe vers l'état fonctionnel
	TimeToRepair1	Parameter	Le temps que prend l'équipement pour sa réparation, c'est le temps où l'équipement est dans l'état (stoppedForMaintenance): `TimeToRepair = time()`
	nbrFailure	Parameter	Le nombre de défaillance que l'équipement subit
	UpTimeSum1	Dynamic Variable	Temps passé par l'équipement dans un état de bon fonctionnement : `prevUpTimeSum + C3*(time-prevUpTime)`
	Time1	Dynamic Variable	Prend la fonction time ()
	MTBFGlob	Dynamic Variable	Calcule l'indicateur de MTBF qui est égale à : `C7*upTimeSum1/(nbrFailure+0.000000001)`
	SumTimeToRepair1	Dynamic Variable	Calcule le temps total consacré à la réparation : `TimeToRepair1 + C8*(time1 - TimeToRepair1)`
	MTTRGlob	Dynamic Variable	Calcule l'indicateur MTTR qui est égale : `SumTimeToRepair1/(nbrFailure+0.000000001)`
	AvailabilityGlob	Dynamic Variable	Calcule la disponibilité de l'équipement : `MTBFGlob/(MTBFGlob + MTTRGlob + 0.000000001)`
	FailureRateGlob	Dynamic Variable	Calcule le taux de défaillance de l'équipement : `1/ ( MTBFGlob + 0.000000001)`
	Failed	Button	Un bouton qui mène à l'état problème : `send("Failed", this);`
	MaintenanceSG	Button	Un bouton qui mène à l'état maintenance: `send("Maintained", this)`
	Fixed	Button	Un bouton qui mène à l'état fonctionnel : `send("Reparation", this)`
	fluidEnter4	Fluid Library	Transmission de gaz de bras de chargement vers le compresseur.
	fluidEnter5	Fluid Library	Transmission de gaz vers le bras de chargement.
	fluidEnter2	Fluid Library	Transmission de gaz du compresseur vers RST.
	fluidEnter	Fluid Library	Transmission de fluide dans l'installation technique qui se constitue de compresseur, pompe, RéservoirSousTalus, BrasDeChargDécharg.
	fluidEnter3	Fluid Library	Transmission de gaz vers compresseur.
Detector Gaz/Flamme	LIE	Parameter	Présente la Limite Inférieure d'Explosivité qui substitue
	ProbDet	Variable	La probabilité d'occurrence des défaillances de maintenance de détecteur. La variable suit une distribution PERT

	CriticlityDet	Dynamic Variable	Calcule la criticité de détecteur : `ProbDet*LIE`
	C3	Parameter	Un paramètre facilite le calcul de temps de bon fonctionnement : - C3 = 1 : si le bras est dans un état de fonctionnement ; - C3 = 0 : si le bras a un problème.
	C4	Parameter	Un paramètre permettant le changement d'état : Si l'état problème donc C4=1, et dans ce cas la MTBF va être calculé.
	C5	Parameter	Un paramètre qui montre le changement d'état : Si l'état maintenance, donc C5=1, et dans ce cas la MTTR va être calculé.
	prevUpTimeSum	Parameter	Temps Total de fonctionnement de l'équipement.
	prevUpTime	Parameter	L'instant où l'équipement passe vers l'état fonctionnel
	TimeToRepair	Parameter	Le temps que prend l'équipement pour sa réparation, c'est le temps où l'équipement est dans l'état (stoppedForMaintenance): `TimeToRepair = time()`
	nbrFailures	Parameter	Le nombre de défaillance que l'équipement subit
	UpTimeSum	Dynamic Variable	Temps passé par l'équipement dans un état de bon fonctionnement : `prevUpTimeSum + C3*(time-prevUpTime)`
	Time	Dynamic Variable	Prend la fonction time ()
	MTBF	Dynamic Variable	Calcule l'indicateur de MTBF qui est égale à : `C4*upTimeSum /(nbrFailures + 0.000000001)`
	SumTimeToRepair	Dynamic Variable	Calcule le temps total consacré à la réparation : `TimeToRepair + C5*(time - TimeToRepair)`
	MTTR	Dynamic Variable	Calcule l'indicateur MTTR qui est égale : `SumTimeToRepair/(nbrFailures+0.000000001)`
	Availability	Dynamic Variable	Calcule la disponibilité de l'équipement : `MTBF/(MTBF + MTTR + 0.000000001)`
	FailureRate	Dynamic Variable	Calcule le taux de défaillance de l'équipement : `1/ ( MTBF + 0.000000001)`
	Fail	Button	Un bouton qui mène à l'état problème : `send("Failure", this);`
	Maintenance	Button	Un bouton qui mène à l'état maintenance: `send("maintenance", this);`
	Fixed	Button	Un bouton qui mène à l'état fonctionnel : `send("Repaired", this);`

	gazDetector	statechart	Représente les états de détecteur: - Working : le détecteur est dans un état de fonctionnement, soit le gaz est détecté (gazDetected), soit non (noGazDetected) ; - Problem : une défaillance de maintenance ; - stopForMaintenance : le détecteur est arrêté pour une intervention de maintenance.
	fluidEnter6	Fluid Library	Détection de Butane liquide dans l'atmosphère
	fluidSource	Fluid Library	Détection de Butane gaz dans l'atmosphère
	distancePump_detector	Parameter	La distance entre la pompe et le détecteur
	volumePump_detector	Parameter	Le volume entre la pompe et le détecteur égale à : `((4.0/3)*PI*(distancePump_detector)*(distancePump_detector)*(distancePump_detector))/2`
	pVBA	Dynamic Variable	La concentration du butane dans l'air suite à une éventuelle fuite de gaz. La variable pVBA est utilisé pour activer l'alarme. Lorsque pVBA dépasse 20% de la LIE, l'alarme du détecteur s'active : `(((0.7*gazButaneInAtm.amount()*1000)/(réservoirSousTalus.M_butane))/(101325*volumePump_detector/(réservoirSousTalus.R*réservoirSousTalus.temperature_K)))*100`
Main	Se constitue des agents suivants (installationsTechniques, posteDeChargDécharg, Operators), il permet de présenter l'identification de camion (vérification de camion), de voir le mode normal de l'installation Technique.		
	unloadingFlow	Parameter	Débit de déchargement.
	numOperator	Parameter	Spécifier le nombre des opérateurs qui sont dans le site
	CC, CP, CB, CD	Parameter	Coefficients pour le calcul de la criticité globale
	VC, VP, VB, VD	Variable	Coefficients pour le calcul de nombre de défaillances
	numberOfAvailableOp	Variable	Prend le nombre des opérateurs qui sont disponibles
	Maintenance KPI	Time Plot	Afficher les indicateurs de performance de maintenance : MTBF, MTTR, Availability, Failure Rate, UtilizationRate, OccpancyRate
		Time Stack Chart	Affiche la disponibilité des opérateurs : - Available Operators ; - MaintOperators : les opérateurs effectuant la maintenance ; - CheckingOperators : les opérateurs qui vérifient la conformité des camions à l'entrée.

		Bar Chart	Présente le taux d'utilisation des opérateurs et le taux d'occupation
		Variable	Donne la valeur globale des indicateurs du système global (installation technique)
	Risk Analysis	checkbox	Chaque checkbox représente une défaillance liée à un équipement. En cliquant sur la checkbox, on obtient la criticité de l'équipement, son état, le nombre de défaillance, le niveau de risque de système global.

Gmail

Maryam Gallab <meryam09@gmail.com>

sollicitation

Bureau, Mr. N. (Nicolas) <NBureau@primagaz.fr> 3 mai 2016 à 13:22
À : Maryam Gallab <meryam09@gmail.com>
Cc : Emmanuel Garbolino <emmanuel.garbolino@mines-paristech.fr>

Bonjour,

A la lecture du fichier ci-joint, si je comprends bien votre souhait, je vous prie de bien vouloir trouver ci-dessous la liste des scénarios qu'il me semble nécessaire d'étudier :

- Manque d'attention lors d'une opération de raccordement de bras de chargement camion et de l'ouverture de la vanne manuelle
- Blocage de clapet cessant la recirculation du fluide (dégradation d'une pompe et apparition d'un UVCE)
- Dépannage de la pompe avec une garniture fuyarde (apparition d'un UVCE en fonctionnement matériel avec définition de la zone des effets et d'un possible jet fire en complément)
- Mauvais alignement de la tuyauterie provoquant une usure prématurée des roulements ou des coussinets de la pompe(défaut de maintenance d'un matériel conduisant à un UVCE ou un jet enflammé)
- Coupure du joint torique de la chemise de garniture lors du remontage de la garniture à cause de la non-protection du filetage de l'arbre (défaut de maintenance d'un matériel conduisant à un UVCE ou un jet enflammé)
- Mise en route du compresseur gaz avec les vannes d'isolement fermées (défaut matériel ou défaut d'application de la consigne de mise en route)
- Mauvais nettoyage ou non remplacement d'une soupape usée/détériorée (défaut de prestation d'un personnel Primagaz dans le respect d'une consigne de maintenance – NC opérationnel)
- Mauvais étalonnage des détecteurs (défaillance opérationnelle altérant la fiabilité de la chaine MMRI)
- Non vérification des seuils de déclenchement de préalarme et d'alarme (défaillance opérationnelle altérant la fiabilité de la chaine MMRI)

Je reste à votre disposition pour toute question complémentaire sur ce sujet,

PRIMAGAZ

Nicolas BUREAU

Chef de Centre

Dpt Industriel / IND

Fixe : 02 47 32 39 22

Mob : 06 08 56 76 20

Centre Emplisseur de Saint-Pierre des Corps

Résumé

Cette thèse a pour objectif principal de développer un simulateur multi-agents pour concevoir un système d'aide à la maîtrise des risques des activités de maintenance. Le but est d'explorer la complexité de la maintenance et de spécifier les interactions entre la fonction maintenance, l'analyse et l'évaluation des risques.
Nous nous intéressons d'une part, à concevoir un modèle systémique permettant d'identifier et de modéliser un système industriel, à montrer les différentes interactions entre ses éléments, à analyser et évaluer les risques des activités de maintenance. Nous proposons la méthode MOSAR et le langage UML pour concevoir un modèle cognitif de référence. Ce modèle a servi de point de départ pour la conception d'une base de données à l'aide du langage SQL, qui est exploitée dans le modèle Multi-Agents afin d'acquérir les informations nécessaires à son fonctionnement.
D'autre part, nous développons une architecture d'un Système Multi-Agents qui a pour vocation d'anticiper les situations de défaillances et la prise de décisions à l'aide de la simulation du comportement du système étudié. Une comparaison entre les plateformes existantes dédiées aux Systèmes Multi-Agents est effectuée pour choisir la plateforme adéquate à notre problématique pour la réalisation de la simulation.
Finalement, les modèles développés sont appliqués dans le cadre d'une chaîne logistique pour le chargement et le déchargement de GPL (Gaz de Pétrole Liquéfié) de l'entreprise PRIMAGAZ-France. Un simulateur a été développé à l'aide de la plateforme AnyLogic dans le but d'étudier le comportement du système et de simuler les scénarios de défaillances choisis par l'industriel pour le calcul de la criticité à partir de trois paramètres (fréquence, gravité, détectabilité) et l'obtention d'un Tableau de Bord contenant un ensemble d'indicateurs de performance de la maintenance. Les modèles de simulation proposés permettent d'orienter les industries vers les bonnes décisions pour éviter les situations à risques pouvant déclencher des événements perturbateurs dommageables.

Mots Clés

Maintenance, Analyse des risques, Modélisation, Simulation, Complexité, Approche systémique, Systèmes Multi-Agents, chaîne logistique GPL, plateforme AnyLogic.

Abstract

The main objective of this thesis is to develop a multi-agent approach to designing a model to overcome risks of maintenance activities. The aim is to explore the maintenance complexity and to indicate the interactions between the maintenance function and the risk assessment.
Firstly, we are interested in designing a systemic model to identify and model the industrial system, to show the different interactions between its elements, to analyze and to evaluate risks of maintenance activities. We propose the MOSAR method and the UML language to design a cognitive reference model. This model served as a starting point for designing a database using the SQL language, which is operated by Multi-Agent model to acquire the necessary information for its operation.
On the other hand, we develop a framework of a multi-agent system that aims to anticipate failures scenarios and the decision-making by simulating the studied system behavior. A comparison between the existing platforms dedicated to Multi-Agent Systems is performed to choose the appropriate platform for the simulation.
Finally, the developed models are applied in the LPG supply chain (Liquefied Petroleum Gas) of PRIMAGAZ-France. A simulator was developed using the AnyLogic platform to study the system behaviour and to simulate the failure scenarios chosen by the industry, for the calculation of the criticality from three parameters (Frequency, severity, detectability), and for obtaining a Dashboard containing a set of maintenance performance indicators. The proposed simulation models help to guide the industries toward good decisions to avoid risky situations that may trigger disruptive events damaging.

Keywords

Maintenance, Risk analysis, Modelling, Simulation, Complexity, Systemic approach, Multi-Agent System, LPG supply chain, AnyLogic Platform.