RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ HADJ LAKHDAR BATNA

INSTITUT D'HYGIÈNE ET SÉCURITÉ INDUSTRIELLE

LABORATOIRE DE RECHERCHE EN PRÉVENTION INDUSTRIELLE(LRPI)

MÉMOIRE

PRÉSENTÉ POUR L'OBTENTION DU DIPLÔME DE

MAGISTER

EN HYGIÈNE ET SÉCURITÉ INDUSTRIELLE

OPTION : GESTION DES RISQUES

PAR

Choayb DJEDDI

INGÉNIEUR D'ÉTAT EN HYGIÈNE ET SÉCURITÉ INDUSTRIELLE

Évaluation de la performance des plans internes d'intervention au moyen des réseaux de Petri

Soutenu en 05 Février 2015 devant le jury d'examen

M. Noureddine BOURMADA	Professeur à l'Université de Batna,	**Président**
Mme. Rachida HAMZI	Maître de Conférences A à l'Université de Batna,	**Rapporteur**
M. Fares INNAL	Maître de Conférences A à l'Université de Batna,	**Co-Rapporteur**
M. Abdellah TAMRABAT	Professeur à l'Université de Batna,	**Examinateur**
M. Mourad KORICHI	Maître de Conférences A à l'Université de Ouargla,	**Examinateur**
M. Makhlouf CHATI	Chef de Service HSE, SONATRACH DP Hassi R'mel,	**Membre invité**

2015

It's good to take risks,

if you manage them well!

Remerciements

Le travail présenté dans ce mémoire a été effectué au sein du Laboratoire de **R**echerche en **P**révention **I**ndustrielle (**LRPI**) de l'Institut d'Hygiène et Sécurité Industrielle - Université de Batna.

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements et toute ma gratitude à Madame Rachida HAMZI, Maître de conférences «A» à l'Institut d'Hygiène et Sécurité Industrielle de l'Université Hadj Lakhdar de Batna, d'avoir accepté de diriger ce travail, de m'avoir fait découvrir ce sujet, pour son aide inestimable et son soutien permanent, afin de finaliser ce mémoire.

Mes remerciements et l'expression de ma profonde gratitude vont aussi à Monsieur Fares INNAL, Docteur en sûreté de fonctionnement à l'Institut d'Hygiène et Sécurité Industrielle, d'avoir accepté de codiriger ce travail et pour l'aide qu'il m'a apporté dans mes travaux et le temps qu'il m'a consacré, tout en me faisant profiter de sa culture et de sa rigueur scientifique.

Un grand merci à Monsieur Makhlouf CHATI, chef de service sécurité industrielle à Sonatrach DP Hassi R'mel, pour ses conseils avisés, son aide et ses encouragements tout au long de mes travaux.

Je tiens à remercier Monsieur Noureddine BOURMADA, Professeur à l'Institut d'Hygiène et Sécurité Industrielle, pour avoir accepté d'être président du jury de ce mémoire.

Mes remerciements vont aussi à Monsieur Abdallah TAMRABAT, Professeur à l'Université de Batna, et à Monsieur Mourad KORICHI, Maître de Conférences à l'Université de Ouargla, pour avoir accepté d'examiner ce mémoire.

Il me reste à remercier toutes les personnes m'ayant - directement ou indirectement, scientifiquement et/ou moralement - aidé et encouragé pendant la réalisation de ce mémoire.

A mes parents…

A toute ma famille …

A ceux qui m'aiment…

A ceux que j'aime…

...Choayb

Table des matières

Remerciements....I
Table des matières....IV
Liste des figures.... VI
Liste des tableaux.... VII
Introduction générale IX

Chapitre I : Plans Internes d'Intervention « PII » : Etat de l'art

I.1. Introduction....1
I.2. Degré de gravité des événements....2
I.3. Processus de gestion des urgences et des crises....3
I.3.1. Prévention 3
I.3.2. Préparation 4
I.3.2.1. Développement des plans de réponse à l'urgence 6
I.3.3. Intervention 8
I.3.4. Rétablissement 8
I.4. Stratégie de réponse aux urgences et aux crises....9
I.4.1. Plan Interne d'Intervention (PII)....10
I.4.2. Missions prise en compte dans les PII 10
I.4.2.1. Activation du PII....11
I.4.2.2. Direction des opérations internes....12
I.4.2.3. Commandement opérationnel 13
I.4.2.4. Intervention....13
I.4.3. Approches d'évaluation de la performance des PII....13
I.4.3.1. Évaluation des PII par le retour d'expérience 13
I.4.3.2. Évaluation des PII par l'audit 15
I.4.3.3. Évaluation des PII par le modèle FIS....15
I.5. Conclusion 16

Chapitre II : Réseaux de Petri; outil d'évaluation de la performance des systèmes complexes

II.1. Introduction 17
II.2. Réseaux de Petri....18
II.2.1. Structures des réseaux de Petri....18
II.2.1.1. Structure statique....18
II.2.1.2. Structures dynamique....19
II.2.2. Evolution d'un réseau de Petri....20
II.2.3. Extensions des réseaux de Petri....23
II.2.4. Simulation de Monte Carlo 23
II.2.5. Réseaux de Petri et logiciel MOCA-RP (SatoDev)....24
II.2.5.1. Lois de transition....25
II.2.5.2. Syntaxe des expressions et messages....27
II.3. Démarche structurée de modélisation des SC au moyen des RdP 28
II.3.1. Couche structurelle et les modules associés....29
II.3.2. Couche opérationnelle et les modules associés....31
II.3.3. Couche d'évaluation 33
II.4. Propagation de l'incertitude dans l'évaluation de la performance des SC....33
II.4.1. Identification des sources d'incertitude 34
II.4.2. Manipulation de l'incertitude par la méthode de simulation de Monte-Carlo 35
II.5. Conclusion 37

Chapitre III : Évaluation de la performance du Plan Interne d'Intervention (PII) SH/DP/HRM au moyen des réseaux de Petri

III.1. Introduction 38
III.2. Présentation du site d'étude....39
III.3. Approche d'évaluation de la performance du PII 39
III.4. Application au Plan Interne d'Intervention (PII) SH/DP/HRM....41
III.4.1. Description de l'événement redouté 41
III.4.2. Niveaux d'intervention et maîtrise du scenario 42
III.4.3. Évaluation de la fiabilité du système de réponse à l'urgence SH/DP/HRM....43
III.5. Discussion des résultats 53
III.6. Conclusion 57
Conclusion générale 58
Bibliographie....61

Liste des figures

Figure I.1− Processus de gestion des urgences et des crises
Figure I.2− Procédure de mise en place des plans de réponse à l'urgence
Figure I.3− Chaine générale de commandement de l'incident
Figure I.4−Schéma général d'organisation
Figure I.5− Plan d'alerte, schéma de principe
Figure I.6− Modèle structuro-fonctionnel d'un Plan d'Opération Interne
Figure II.1− Mathématisation de la structure d'un Réseau de Petri
Figure II.2− Mathématisation du marquage d'un Réseau de Petri
Figure II.3− Mathématisation de l'évolution du marquage d'un Réseau de Petri
Figure II.4− Graphe de marquage
Figure II.5− Règle de tir de la transition avec loi dite « défaillance à la sollicitation »
Figure II.6− Présentation d'un module physique
Figure II.7− Présentation d'un module de synthèse
Figure II.8− Principales méthodes de modélisation des incertitudes
Figure III.1− Module physique des ressources
Figure III.2− Module activité
Figure III.3− Nœud reflux débutaniseur
Figure III.4− Niveaux d'intervention - Maîtrise du scénario
Figure III.5− Eléments du processus signalement d'alerte
Figure III.6− Eléments du processus intervention opérationnelle
Figure III.7− Eléments du processus intervention incendie
Figure III.8− Module de synthèse. Boucle de détection automatique
Figure III.9− Activité Signalement d'alerte
Figure III.10− Activités du processus intervention opérationnelle
Figure III.11− Activités du processus intervention incendie
Figure III.12− Modules contextuels
Figure III.13− Courbes de fiabilité du PII sans et avec incertitude des paramètres
Figure III.14− Nœud reflux débutaniseur après modification
Figure III.15− Courbe de fiabilité du PII après les améliorations proposées

Liste des tableaux

Tableau II.1− Loi Dirac et ses caractéristiques
Tableau II.2− Loi log-normale et ses caractéristiques
Tableau II.3− Loi uniforme et ses caractéristiques
Tableau III.1− Probabilité de défaillance des éléments physiques de la phase signalement d'alerte
Tableau III.2− Probabilité de défaillance des éléments physiques de la phase intervention opérationnelle
Tableau III.3− Probabilité de défaillance des éléments physiques de la phase intervention incendie
Tableau III.4− Indicateurs de performance du plan interne d'intervention
Tableau III.5 : Résultat de la simulation avec incertitude aléatoire et sans incertitude des paramètres
Tableau III.6− Résultats obtenus avec l'incertitude aléatoire et l'incertitude des paramètres
Tableau III.7: Résultat de la simulation Monte-Carlo avec incertitude aléatoire et incertitude des paramètres après les améliorations proposées

Liste des acronymes et abréviations

CGM	Courbe de Gestion des Moyens
CMP	Courbe de Monté en Puissance
DOP	Direction des Opérations Internes
DOIL	Direction des Opérations Internes Locales
DOIR	Direction des Opérations Internes Régionales
DOIN	Direction des Opérations Internes Nationales
DP	Division Production
EDD	Etude De Danger
EI	Equipes d'Intervention
EI	Evénement Initiateur
ER	Evénement redouté
FIS	Fonctions – Interactions – Structure
GPL	Gaz de Pétrole Liquéfié
HRM	Hassi R'mel
ICPE	Installation classée pour la protection de l'environnement
ICS	Incident Command System
MOCA-RP	Monte-Carlo basé sur les réseaux de Petri
MPP	Module Processing Plant
OREDA	Offshore reliability Data
ORSEC	Organisation des secours
PAM	Plan d'aide mutuelle
PCO	Poste de Commande Opérationnel
PCT	Poste de Commande Tactique
PCS	Poste de Commande Stratégique
PFD	Probability of Failure on Demand
PIC	Pressure Indicator Controller
PII	Plan Interne d'Intervention
PIM	Plan d'Intervention Médicale
RdP	Réseau de Petri
REX	Retour d'expérience
SH	Sonatrach
Sonatrach	Société Nationale pour la Recherche, la Production, le Transport, la Transformation et la Commercialisation des Hydrocarbures

Introduction générale

1. Problématique

S'il est admis que le risque zéro n'existe pas, les actions de limiter, gérer et manager les risques par priorité à la source, restent au centre des priorités des exploitants des installations industrielles. En effet, l'occurrence d'accidents majeurs survenus dans le domaine pétrolier à travers le monde, est la preuve que le risque est omniprésent, d'où la problématique des risques d'accidents industriels. Ceci nécessite une approche globale, permettant, sur la base de l'analyse du retour d'expérience, d'enrichir la réflexion, déjà entamée sur la manière à adopter en matière de circonscription des risques majeurs et les moyens les plus efficaces à mettre en œuvre tant au stade de la prévention que ceux de la gestion des urgences et de la planification de secours.

Dans ce contexte, poser la problématique des risques industriels en Algérie, c'est doter d'une stratégie (prévention /protection) qui s'appuie sur un système de gestion et de planification de secours performant permettant la mise en œuvre de tous les moyens susceptibles de réduire ces risques et de limiter leurs conséquences sur les populations susceptibles d'être touchées.

Un Plan Interne d'Intervention (PII) est aussi une exigence réglementaire, élaboré et mis en œuvre sous la responsabilité des exploitants des installations industrielles dites ICPE (Etablissements Classés pour la Protection de l'Environnement), sur la base des résultats des Etudes de dangers EDD.

Malgré le caractère très encadré de l'élaboration et la mise en œuvre des PII, des contraintes diverses peuvent émailler leur mise en place efficacement et perturber leur opérationnalité. La fréquence et l'impact de ces défaillances peuvent être réduits par l'analyse fonctionnelle des PII.

Des efforts considérables ont été consacré à l'évaluation de la performance des plans de réponse à l'urgence [Alexander, 2002; Alexander, 2005; Mayer, 2005; Kanno et Furuta, 2006; Jackson, 2008; Karagiannis, 2010] et des approches ont été développées en se basant sur des outils génériques qualitatifs tels que : Retour d'expérience REX, audits, approche FIS, …. Ces derniers présentent certaines limites quant à l'évaluation quantitative de la performance en l'absence de méthodes d'analyse éprouvées.

Dans ce contexte, notre contribution se focalise sur l'évaluation des indicateurs clé de performance des PII, en se basant sur une approche probabiliste (étude de fiabilité), au moyens des outils de sûreté de fonctionnement dont les réseaux de Petri RdP sont les plus adaptés (modélisation et analyse du comportement dynamique du PII).

Cette approche permettant également d'estimer la probabilité de défaillances à la sollicitation PFD du système PII comme indicateur important de l'évaluation de la fiabilité dynamique du PII et d'améliorer et maintenir sa performance dans le temps. Cette démarche met l'accent sur l'évaluation prévisionnelle de la fiabilité du PII à partir des taux de défaillance de ces composants (approche probabiliste), permettant par la suite de décider des actions nécessaires pour l'amélioration de la performance globale du PII.

2. Objectif

L'objectif principal de ce mémoire est l'évaluation de la performance du système de réponse à l'urgence PII, en se basant sur des outils d'analyse de sûreté de fonctionnement par la modélisation du comportement dynamique des PII au moyen des réseaux de Petri couplés à la simulation de Monte-Carlo (MOCA-RP), en suivant les indicateurs clés caractérisant la performance du PII. Le concept ''incertitude'' et sa propagation ont été également abordés, comme facteurs influençant significativement les résultats d'évaluation de la performance des PII.

3. Organisation du mémoire :

La démarche adoptée pour l'élaboration de notre mémoire s'organise, logiquement, en trois chapitres :

i- Le premier chapitre permet de s'introduire dans le sujet, comprendre le pourquoi de cette étude, poser une problématiques de la maitrise des risques, puis mettre en lumière la démarche suivie pour le traitement de sujet d'évaluation de la performance des plans d'urgences, commençant par un état de l'art des Plans Internes d'Intervention (PII), le processus de gestion des urgences, les études et les approches développées en matière d'évaluation de leurs performances, puis analysant les approches précitées et les plans d'urgences mises en œuvre dans une optique à la fois exploratoire et critique en vue de cadrer notre étude.

ii- Le deuxième chapitre est consacré à la présentation succincte des réseaux de Petri et la simulation de Monte-Carlo, puis présentant une démarche structurée, proposée dans le cadre du présent mémoire, en couplant les deux outils RdP et MOCA comme outils de modélisation du comportement dynamique des systèmes complexes et d'évaluation de leurs performance. Ensuite, nous traitant le concept de l'incertitude, sa propagation et leurs influences sur les résultats d'évaluation de la performance des PII.

iii-Le troisième chapitre présente une étude de cas et une mise en application succincte de la méthodologie proposée pour l'évaluation de la performance du système de réponse à l'urgence PII de Sonatrach DP Hassi R'Mel pour un scénario représentatif (enveloppe) au moyen du MOCA-RP.

A la fin, le présent mémoire est cadré par une conclusion générale synthétisant la démarche adoptée, les résultats obtenus et les perspectives de futures recherches.

Chapitre 1

Plans Internes d'Intervention « PII »

Etat de l'art

I.1. Introduction

Les industriels visent à réduire la probabilité de la survenance de situations d'urgence pendant le déroulement de leurs opérations, mais reconnaît toutefois que de telles situations peuvent se produire et qu'il est indispensable de mettre en place des plans efficaces pour faire face à de telles urgences, qui sont en même temps conformes à la loi et complètement opérationnels.

En raison de l'extrême importance de ces plans, nous sommes intéressés dans le cadre de ce mémoire à l'évaluation de leurs performance et les mettre aux plus hauts niveaux d'efficacité afin de réduire ou de limiter les conséquences des urgences et des crises ou, dans certains cas de les empêcher de se produire.

L'objectif de ce premier chapitre est de déterminer l'état de l'art des Plans Internes d'Intervention, dans un premier temps nous présenterons le degré de gravité des événements. Dans un second temps nous décrirons les étapes générales du processus de gestion des urgences et des crises. Afin de positionner notre contexte de mémoire et nos objectifs de travail, nous aborderons dans un troisième temps la stratégie de réponse aux urgences et aux crises et nous focaliserons sur les PII et les approches existantes en termes d'évaluation de leurs performances et les limites de ces approches. Ceci va nous permettre, de mettre en évidence notre problématique et de définir notre approche de travail.

I.2. Degré de gravité des événements

Selon [Lagadec, 2000; OCDE, 1992], un accident industriel est un événement tel qu'une émission de matière toxique, un incendie ou une explosion résultant de développements incontrôlés d'une perte de confinement survenus dans une activité industrielle chimique et/ou pétrochimique qui engendre un danger grave, immédiat ou ultérieur, pour l'homme tant à l'intérieur qu'à l'extérieur de l'établissement et dans lequel une ou plusieurs substances dangereuses sont impliquées.

Une échelle de gravité des accidents est définie, elle classe les accidents en trois niveaux selon une graduation de la gravité du phénomène, Incident, Urgence et Crise et à chaque niveau correspond une structure de gestion plus ou moins complexe qui est développée dans des plans internes ou externes d'intervention [DCSSE, 2007]:

- **Niveau 1 : Incident**

Selon [Perrow, 1999; Perilhon, 2002; DCSSE, 2007], un Incident se définit comme «toute situation résultante d'un événement non souhaité n'ayant qu'un impact faible envers les personnes, l'environnement et l'installation».

- **Niveau 2 : Urgence**

Selon [DCSSE, 2007; Cédrick, 2011], une Urgence se définit comme «toute situation résultante d'un événement non souhaité ayant un impact grave envers les personnes, l'environnement et l'installation et nécessitant la coordination de différents intervenants pour faire disparaître la menace ou de limiter les conséquences néfastes».

- **Niveau 3 : Crise**

Selon [Roux-Dufort, 2003; DCSSE, 2007; Dewil, 2010], une Crise se définit comme «toute situation résultante d'un événement rare et brutal provoquant une rupture et un déséquilibre entre besoins et moyens et ayant un impact catastrophique envers les personnes, l'environnement et l'installation et sur la réputation et les capacités professionnelles des établissements ».

De manière à faire face aux urgences et aux crises, diverses actions sont mises en œuvre. Ces actions sont organisées en quatre phases, qui font l'objet du paragraphe suivant.

I.3. Processus de gestion des urgences et des crises

La gestion des urgences et des crises est un processus continu, dynamique, proactif, réactif et réflectif, qui s'articule autour de quatre phases bien identifiées, avant, pendant et après la crise. Ces quatre phases sont illustrées sur la figure I.1 et sont:

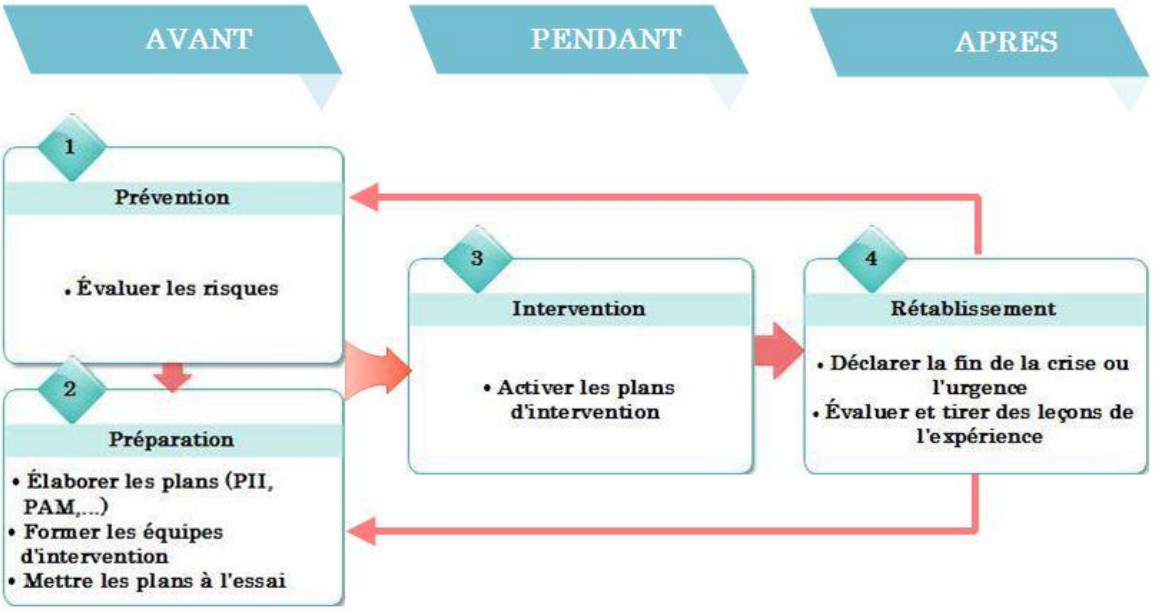


Figure I.1– Processus de gestion des urgences et des crises
[adapté depuis DCSSE, 2007]

I.3.1. Prévention

La prévention est la phase initiale du processus de gestion des urgences et des crises et doit être mise en place avant la survenue d'une crise. Elle a pour objectif d'amener le risque de crise à un seuil acceptable et, quand cela est possible, d'éviter que la crise ne se produise effectivement [Kaddoussi, 2012]. Elle s'agit d'actions continues visant à réduire ou éliminer le risque pour les personnes, les biens et l'environnement sur le long-terme et elle regroupe les activités proactives, mises en place par les organisations pour analyser et évaluer les niveaux de risque et de menace d'un territoire. Sur la base de ces études, des scenarios sur les accidents et crises potentiels sont établis afin de mettre en place des mesures de prévention des risques.

I.3.2. Préparation

Ce terme désigne les actions prises pour se préparer à intervenir efficacement lors d'une crise ou d'une urgence et à atténuer leur impact sur les populations vulnérables. Elles consistent notamment à développer des différents types de plans de réponse à l'urgence et les mettre à l'essai. Il s'agit par exemple des plans internes d'intervention « PII », d'assistance mutuelle (PAM), d'intervention médicale (PIM) ou de sûreté (terrorisme et autres actes de malveillance).

Sur la base des analyses de risques, les organisations vont alors planifier les ressources humaines et matérielles permettant de répondre aux scenarios établis, déterminer les moyens de communication, définir un réseau de structures de réponse supportant la coordination des acteurs, et pour cela tout un ensemble de plans est rédigé afin d'aider les décideurs au moment venu. Ils contiennent les différents scenarios de crises, des annuaires recensant les divers acteurs, la composition des cellules de crise, les rôles et les objectifs de chacun.

Cette phase de planification est également l'occasion de préparer les organisations, au travers des exercices de simulation et les formations des équipes d'intervention, afin d'assurer la disponibilité, la rapidité de mobilisation et de déploiement des ressources nécessaires pour gérer les urgences potentielles, définies en amont dans les scenarios de risques en appliquant des plans exposés précédemment.

Le retour d'expérience à partir des divers plans de réponse à l'urgence a permis de mettre en évidence des principes et méthodes à mettre en œuvre afin de faciliter le développement des plans internes ou externes d'intervention. Ces principes et méthodes sont résumés en trois approches [FEMA, 2009]:

- **Planification basée sur des scénarios** : Selon cette approche, le comité de planification met en place un scénario de base pour chaque risque. Un scénario est une description plus ou moins explicite de l'évolution anticipée de la survenue d'un aléa naturel et/ou technologique. Ensuite, une analyse effectuée sur ce scénario permet de développer les hypothèses principales du plan et de définir les actions globales et spécifiques à mettre en œuvre.

- **Planification basée sur les fonctions opérationnelles** : Cette approche est également connue comme planification fonctionnelle. Elle permet d'identifier les tâches courantes à mettre en œuvre lors d'une situation d'urgence. Selon ce type de planification, le comité de planification définit les fonctions à effectuer et une combinaison d'autorités compétentes à qui la responsabilité de chaque tâche est attribuée.
- **Planification basée sur les capacités opérationnelles** : Cette approche examine la capacité de l'organisation territoriale à effectuer une action. Le comité de planification se pose des questions sur l'agrégation des personnels, de leurs formations, des plans de réponse à l'urgence, de l'organisation, du commandement et de la direction, des équipements et des infrastructures disponibles, et de leur capacité pour la mise en œuvre d'une action. Cette méthode est souvent vue comme une combinaison des deux approches ci-dessus.

En réalité, une méthode hybride de planification est utilisée. Cette méthode constitue une combinaison de plusieurs aspects des trois approches précédentes. L'utilisation de la méthode hybride permet de « traduire » les risques identifiés dans une analyse des risques effectuée au préalable (par exemple, dans le cadre des risques technologiques, les études de dangers des installations industrielles) en des scénarios d'accidents. Ces scénarios sont ensuite utilisés afin d'identifier les besoins opérationnels qui risquent d'être créés en cas de survenue d'un aléa naturel et/ou technologique. Ces besoins opérationnels constituent les objectifs à atteindre. Cette procédure conduit à un plan qui décrit les rôles, les interactions et les responsabilités des différents acteurs, ainsi que le séquencement des actions à effecteur. La méthode hybride de planification permet par conséquent d'identifier les capacités d'un territoire en termes de gestion de situation d'urgence ; tout en étant basée sur une approche intégrale [Karagiannis, 2010].

1.3.2.1. Développement des plans de réponse à l'urgence

La réalisation d'un plan de réponse à l'urgence est souvent conduite comme un projet de grande ampleur. Plusieurs guides à l'attention des comités de planification ont été édités par des autorités nationales de plusieurs pays [DDSC, 1985; FEMA, 1996; U.S. NRT, 2001; FEMA, 2003; EMA, 2004; DDSC 2006 ; DDSC, 2007 ; FEMA, 2009; MIPMEPI et MICL, 2010], mais aussi par des organismes d'envergure nationale ou internationale [Kent, 1994; IFRC, 2007; GESIP, 2001]. Ils préconisent une procédure générale à suivre afin de mettre en place un plan de réponse à l'urgence. Cette méthode de planification comporte de façon générale les étapes suivantes (fig. I.2) :

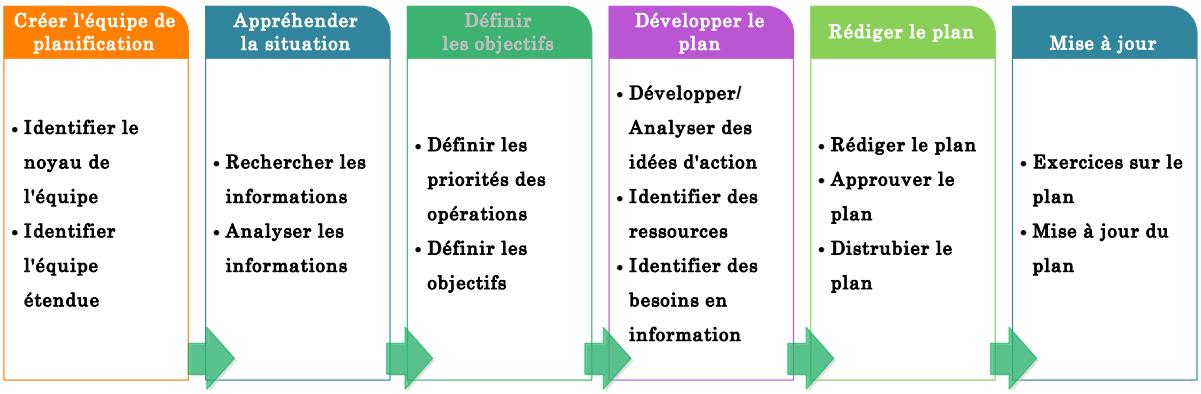


Figure I.2– Procédure de mise en place de plans de réponse à l'urgence [adapté depuis FEMA, 2009]

a. **Créer l'équipe de planification.** Un plan de réponse à l'urgence est développé en équipe. La formation d'une équipe de planification permet aux différents acteurs de bien définir leurs rôles dans le dispositif de gestion des risques.
b. **Appréhender la situation**. Cette étape constitue la partie analytique du processus de résolution de problèmes et de prise de décision. La première partie est la recherche des informations pertinentes sur les risques envisagés. Les membres du comité de planification fournissent les premiers renseignements dans cette étape. les études de danger constituent la source d'informations indispensable pour le développement du plan. La deuxième partie est l'analyse des informations, afin de produire les faits et hypothèses qui seront utilisées afin de définir les besoins opérationnels.

c. **Définir les objectifs.** En utilisant les informations disponibles à partir de l'étape précédente, des scénarios d'accidents sont développés. Le développement des scénarios permet de définir les besoins opérationnels qui déterminent les actions à effectuer et les ressources nécessaires pour ceci. Les opérations de gestion d'une catastrophe ont trois objectifs principaux : sauver et protéger les personnes, protéger les biens, et protéger l'environnement. La protection de la vie humaine est la priorité principale des opérations d'urgence après toute catastrophe. Pour atteindre ces 3 objectifs, des activités opérationnelles conséquentes doivent être entreprises immédiatement après la survenue de l'événement [McEntire, 2005 ; FEMA, 2009]. Les besoins opérationnels qui en résultent sont classés en besoins créés par l'incident et ceux induits par la gestion de l'incident. Les besoins créés par l'incident sont ceux qui résultent directement du phénomène dangereux. Ils se manifestent pendant ou immédiatement après la survenue de l'incident.
d. **Développer le plan.** A ce stade, des solutions potentielles pour atteindre les objectifs définis pendant l'étape précédente sont recherchées. La méthode hybride de planification est utilisée pour illustrer l'évolution du scénario à travers le temps et identifier des points de décision critiques, les tâches opérationnelles, les ressources nécessaires pour les accomplir et les besoins en information.
e. **Rédiger et approuver le plan.** Une fois l'idée opérationnelle mise en place, les résultats du travail sont transformés en un plan écrit. Le document doit être succinct et simple, afin d'être facilement appréhendé par tous les acteurs impliqués. Un document est diffusé aux organisations ayant des responsabilités dans la mise en œuvre du plan afin d'avoir leur retour et approbation. Une fois les commentaires reçus, le document final est arrêté par les Elus ou le représentant de l'Etat, selon les modalités réglementaires. Des copies du document sont diffusées aux acteurs concernés, et une liste des copies est maintenue afin d'assurer la diffusion des mises à jour.

f. **Exécuter et mettre à jour le plan**. Outre la mise en œuvre du plan en cas d'accident réel, les exercices de simulation permettent aussi d'évaluer l'efficacité du plan. De plus, ils sont un moyen de formation des acteurs en gestion de crise et aux modalités du plan, mais permettent aussi d'identifier les défaillances dans la mise en œuvre du plan et d'arriver aux modifications nécessaires.

   Outre les modifications grâce au retour d'expérience (rapport des exercices de simulation et des accidents réels), des mises à jour du plan sont également nécessaires suite à des changements importants de la situation, ou lorsque la réglementation en vigueur l'impose.

I.3.3. Intervention

La phase de la réponse opérationnelle commence par l'activation des plans de réponse à l'urgence suivant la survenue d'un événement dangereux. Elle englobe toutes les actions effectuées (intervention, sauvetage et évacuation) afin de s'occuper des conséquences d'une crise ou d'une urgence, mettre les personnes en sécurité, protéger les biens et limiter les effets de l'événement sur l'environnement. Cette réponse revêt différentes formes en fonction de la localité, de la durée et de la gravité des conséquences.

I.3.4. Rétablissement

Le retour à la normale est mise en œuvre progressivement après la déclaration de la fin de l'urgence ou de la crise, par minimiser leur effets, limiter les impacts sur l'environnement et la population locale, évaluer et tirer des leçons de l'expérience. À plus long terme, l'objectif est de ramener les systèmes à la normale, qu'il s'agisse d'environnement, d'économie, de la reconstruction des établissements ou autres.

La gestion des situations d'urgence et de crise dans le secteur industriel en Algérie repose sur de multiples acteurs ayant des missions différentes bien identifiées dans des plans internes ou externes d'intervention. La partie suivante se focalise sur la description de la stratégie de réponse à l'urgence mise en place lors des situations d'urgence et/ou de crise et plus particulièrement sur les plans internes d'intervention « PII ».

I.4. Stratégie de réponse aux urgences et aux crises:

Le système de gestion des situations d'urgence et de crise, appelé Incident Command System (ICS) permet d'améliorer la coordination entre les différentes structures concernées et de mobiliser rapidement les moyens humains et matériels nécessaires aux interventions. Il définit également les rôles et responsabilités pour chaque niveau de l'organisation.

Ce système de Commandement de l'Incident se déploie sur trois niveaux de gestion en fonction du degré de gravité de l'incident [DCSSE, 2007] (Fig. I.3) :

- **Niveau 1 (Plan Interne d'Intervention « PII »)**: il a pour fonctions essentielles le confinement de l'incident et la préservation de la sécurité du personnel et l'environnement. Il est contrôlé par le Poste de Direction des Opérations Internes Locales et le Poste de Commande Opérationnel au niveau du site sinistré.
- **Niveau 2 (Plan d'Aide Mutuel « PAM »)**: il a pour fonctions de minimiser l'impact de l'incident au niveau régional et d'assurer la coordination de l'opération au niveau local en liaison avec les autres sites à proximité de l'incident. Il est contrôlé par le Poste de Commande Tactique (Direction des Opérations Internes Régionales).
- **Niveau 3 (Plan de Gestion de Crise, ORSEC)**: il a pour fonctions la gestion globale de tous les incidents, la communication avec les parties prenantes concernées et le suivi des activités et engagements commerciaux et autres en situations d'urgences et de crises. Il est contrôlé par le Poste de Commande Stratégique au niveau central (Direction des Opérations Internes Nationales).

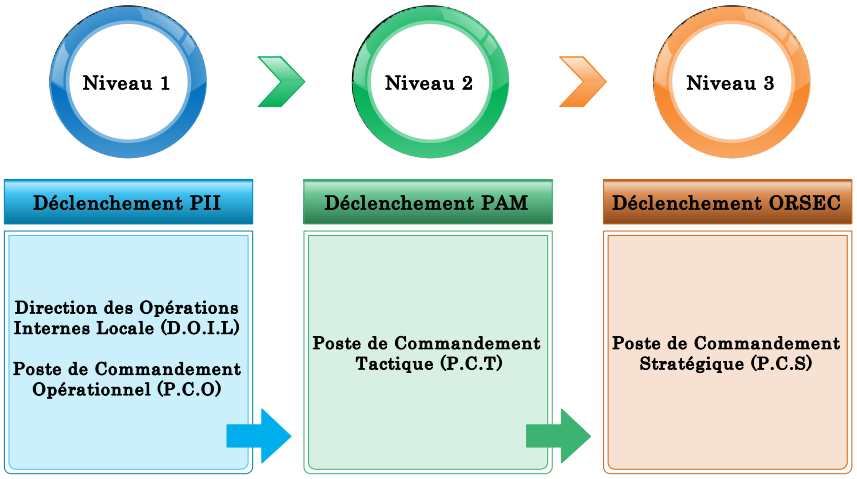


Figure I.3– Chaine générale de Commandement de l'Incident « ICS »

I.4.1. Plan Interne d'Intervention « PII »

La réglementation de plusieurs pays impose la mise en place des plans de réponse à l'urgence afin d'assurer la capacité de réaction face aux accidents industriels majeurs [Karagiannis, 2010], dont la législation algérienne impose le développement et la mise en place du Plan Interne d'Intervention « PII ». Ce dernier a été élaboré conformément au Décret exécutif N° 09-335 du au 20 octobre 2009 [JORADP, 2009]; fixant les modalités d'élaboration et de mise en œuvre des plans internes d'intervention par les exploitants des installations industrielles.

Le PII est établi pour définir l'organisation des secours et des interventions en cas de sinistre à l'intérieur du site. Il vise à protéger le personnel, la population et l'environnement immédiat et décrit les mesures à prendre pour protéger le personnel, remettre en sûreté les installations et éviter que la catastrophe ne prenne une plus grande ampleur.

Le PII est établi sur la base de l'analyse de risques, il définit les conditions de gestion de l'accident et de ses conséquences, il décrit en fonction des scénarios d'accidents majeurs, l'organisation de l'alerte, des secours et de l'intervention. Il comporte également les dispositions à mettre en œuvre pour informer les services de l'État et les médias. Ce plan décrit ainsi la gestion de l'intervention dans le cas où un scénario d'accident identifié dans l'analyse des risques comme scénario critique se produit.

Dans le PII sont décrits pour chaque scénario la stratégie de l'intervention, les premières interventions, le déroulement de l'attaque et les moyens nécessaires à chaque phase de l'intervention. Les risques d'escalade du sinistre sont identifiés, la conduite à tenir et les mesures de précautions à respecter sont signalées.

I.4.2. Missions prises en compte dans les PII

Le PII définit une organisation de secours en 3 niveaux (les équipes d'interventions, un Poste de Commandement Opérationnel, un Poste de Direction des Opérations Internes) mise en place en interne de l'établissement (voir fig I.4), l'interface avec les autres plans (PAM, ORSEC, Crise….) et également les différents tiers impliqués dans l'accident. Il précise la structure de cette organisation, le rôle exact de chacun des intervenants et les liens hiérarchiques entre les différentes entités mobilisées.

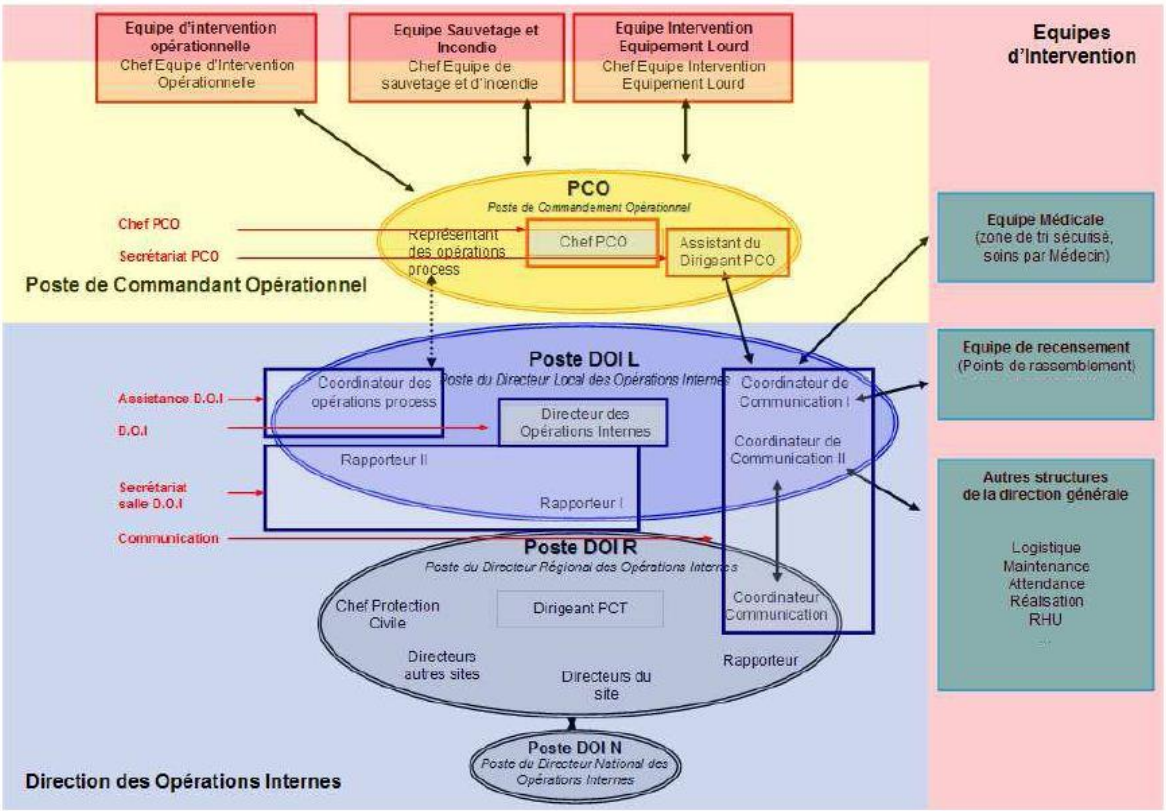


Figure I.4−Schéma général d'organisation [DNV, 2011]

Les principales missions prises en compte dans le cadre des Plans Interne d'Intervention sont :

I.4.2.1. Activation du PII

L'alerte est la fonction la plus importante, car elle assure le déclenchement du PII. Ce dernier définit la chaine d'alerte qui illustre la logique employée sur le site dans l'organisation des communications et la mobilisation des acteurs impliqués. Cette chaine commence par la détection d'un incident par des moyens automatiques ou par un témoin. Après qu'un incident est détecté, l'alerte est répercutée à tous les acteurs du PII qui sont ainsi mobilisés. Enfin, lorsque la situation est sous contrôle, la fin de l'incident est déclarée par le niveau hiérarchique approprié (Voir fig I.5) [Karagiannis, 2010; DNV, 2011].

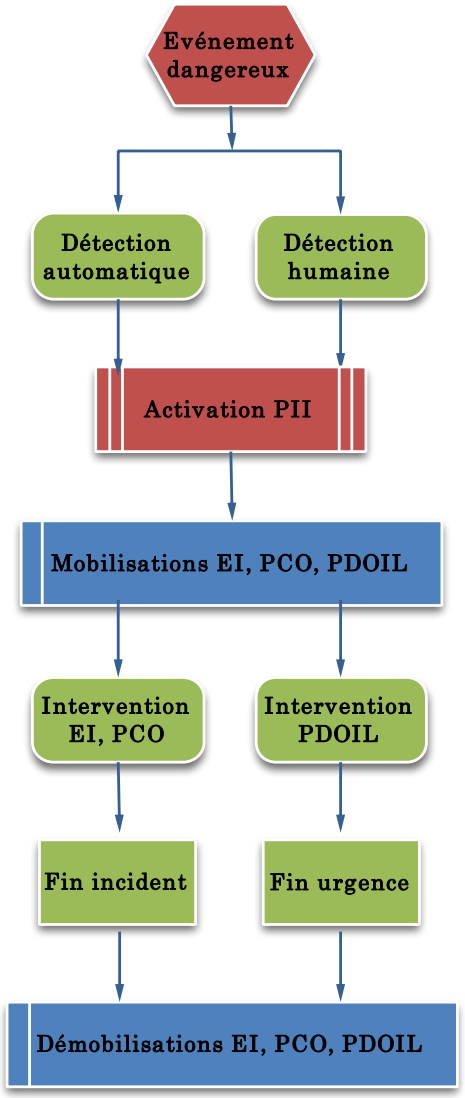


Figure I.5– Plan d'alerte, schéma de principe [adapté depuis DNV, 2011]

I.4.2.2. Direction des opérations internes

La mission de direction des opérations internes locale consiste en la réponse à l'urgence par la prise de toutes les dispositions qui s'imposent pour confiner l'incident, la supervision de l'ensemble des actions de communication (personnel interne, autorité, média et famille), la validation de la stratégie d'intervention, l'organisation des secours, le contrôle et l'information des autorités et administrations concernées de l'évolution possible de l'événement, recueillir les informations et la coordination avec les différents acteurs d'intervention. Le Poste de Direction des Opérations Internes Local dirige, oriente et coordonne la gestion de l'incident sur le site pendant toute sa durée.

I.4.2.3. Commandement opérationnel

La mission du commandement opérationnel consiste à commander l'intervention sur site en ayant une vision globale des opérations en cours et des risques d'effets domino ou de sur-accidents. Le Poste de Commandement Opérationnel coordonne le travail d'analyse, d'anticipation et d'application, recueillir les informations sur la situation et l'évolution du sinistre et de l'intervention, élabore les tactiques d'intervention, applique les décisions du DOI, s'assure de la bonne circulation de l'information, dirige et coordonne les équipes d'intervention présentes sur le site.

I.4.2.4. Intervention

La mission d'intervention est assurée par les équipes d'intervention (incendie, opérationnel, …) présentées sur le site. Les équipes d'intervention incendie appliquent le tactique d'intervention après validation par D.O.I, assurent la lutte de première intervention, le sauvetage, les premiers soins et l'évacuation des blessés, la protection des installations voisines, la définition des moyens nécessaire à mettre en œuvre et la prévision du temps nécessaire pour déployer ces moyens et pour ce dernier, une courbe de montée en puissance est utilisée à cet effet [GESIP, 2000]. Les équipes d'intervention opérationnelle consiste à assurer le contrôle du procédé. Elle a pour objectifs essentiels d'éviter un sur-accident ou un effet domino par la réalisation des opérations de sectionnement des zones sinistrées concernées, déviations des flux, d'arrêts potentiels des installations… etc.

I.4.3. Approches d'évaluation de la performance des PII

Il existe trois approches d'évaluation de la performance des Plans Internes d'Intervention à savoir :

I.4.3.1. Évaluation des PII par le retour d'expérience

Le retour d'expérience est important pour améliorer les performances en matière de la réponse à l'urgence dans les activités industrielles. Et dans le but d'évaluer l'efficacité globale des mesures prévues dans le PII, les exercices de simulation s'avèrent des outils indispensables. Effectivement, la mise en œuvre simulée du plan sera l'occasion pour les « participants de mettre en pratique les apprentissages théoriques, de se familiariser avec leurs rôles et responsabilités

en situation d'urgence et de valider les différentes procédures établies dans le PII » [CRAIM, 2007].

La législation algérienne impose la réalisation d'au moins deux exercices de simulation PII par an (décret 09-335, article 15) [JORADP, 2009]. Ces exercices sont organisés pour s'assurer du bon fonctionnement du PII et des équipes d'interventions. La simulation du déploiement du PII facilitera donc l'évaluation des ressources prévues (humaines, matérielles). Par ailleurs, la mise en pratique du plan favorise le travail d'équipe et la communication entre les divers intervenants. En somme, les exercices de simulation servent en quelque sorte de complément à la formation des intervenants et, de ce fait, contribuent grandement à l'amélioration de la capacité de réponse en cas de situation d'urgences [Cédrick, 2011].

L'amélioration des PII par le retour d'expérience est basée en général sur les rapports qui suivent les exercices de simulation et les incidents nécessitant l'activation du PII. Bien que les accidents réels soient le seul vrai test du plan, les exercices de simulation peuvent aussi évaluer une partie ou la totalité du PII [Karagiannis, 2010].L'ensemble des actions effectuées ont été supervisées pour en analyser, en fin de manœuvre, et répertorier les causes des non-conformités éventuelles. Les rapports comportent un narratif succinct de l'opération, accompagné d'un exposé sur les éléments de l'action qui ont bien ou mal fonctionné et des propositions d'amélioration. Ces informations sont ensuite utilisées par la hiérarchie afin de faire évoluer la doctrine, les méthodes et les techniques opérationnelles [Karagiannis et al., 2010].

Le retour d'expérience peut mettre en évidence des aspects du plan qui sont plus ou moins efficaces ou qui nécessiteraient des modifications. Une analyse approfondie peut même révéler quelles modifications sont nécessaires. Le processus du retour d'expérience identifie des défaillances déjà survenues mais ne permet pas une analyse exhaustive des PII [Jackson, 2008 ; Lagadec, 2007].Plusieurs auteurs ont déjà souligné le besoin d'une analyse systémique de ces plans [Alexander, 2002 ; Alexander, 2005 ; Mayer, 2005 ; Kanno et Furuta, 2006 ; Jackson, 2008]. En revanche, peu de travaux se sont vraiment intéressés à développer une méthodologie pour l'analyse des PII [Ramsay, 1999 ; Larken et al., 2001; Karagiannis et al., 2010].

I.4.3.2. Évaluation des PII par l'audit

L'approche d'évaluation des PII par l'audit consiste à évaluer directement la performance du plan en utilisant des questions avec l'aide des facteurs identifiés par un grand nombre d'expert [Larken el al., 2001].

La performance est évaluée par des questions ciblées sur la qualité du plan, sur la prise en compte de tous les indicateurs définis dans la méthode, ainsi que sur la capacité du plan à répondre aux exigences réglementaires. Des scores sont attribués aux réponses à ces questions, et un score final est produit. Malgré son caractère pragmatique et pertinent, cette méthode manque de structure. L'identification des facteurs à évaluer est basée sur l'expertise et ne prend pas en compte la structure des PII. De plus, l'agrégation des scores est basée sur une somme des points obtenus par les différentes questions et ne prend pas en compte l'importance relative des différents aspects du plan [Karagiannis, 2010].

I.4.3.3. Évaluation des PII par le modèle FIS

L'École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne [Karagiannis, 2010] a développé une méthode, pour l'analyse de la robustesse des PII en utilisant la méthode FIS. Cette recherche a utilisé l'outil informatique (XRisk) développé pour la modélisation structuro-fonctionnel et l'analyse des risques des systèmes complexes. Le modèle a permis de structurer l'analyse et d'identifier les défaillances pouvant se manifester pendant la gestion de crise (voir Figure I.6) [Lachtar, 2012].

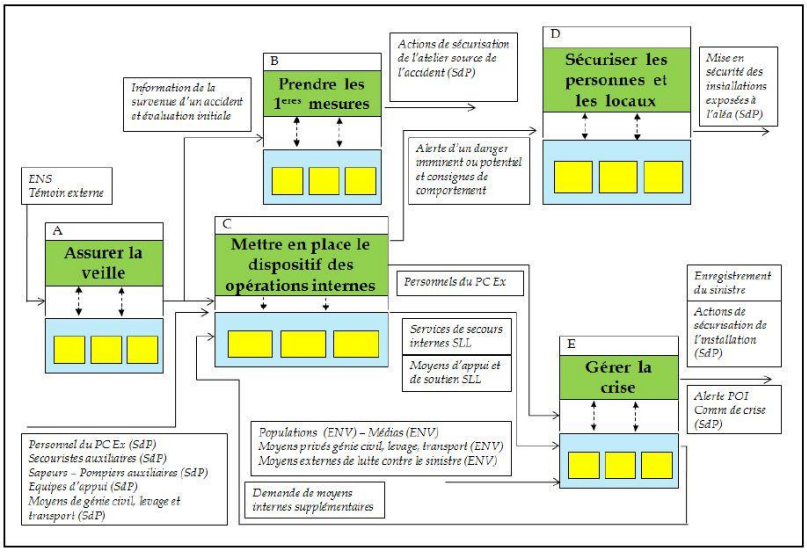


Figure I.6− Modèle structuro-fonctionnel d'un Plan d'Opération Interne [Karagiannis, 2010]

Chaque type de ressources est caractérisé par un ensemble d'attributs (dont des arbres de défaillances) qui permettent de calculer la probabilité de la défaillance des ressources. La probabilité de défaillance des fonctions du modèle est calculée à partir des probabilités de défaillances des ressources associées à travers l'arbre de défaillances de chaque fonction. La gravité de défaillance de chaque fonction est estimée suivant les conséquences maximales de cette défaillance sur le système et son environnement. La combinaison de la probabilité et de la gravité de défaillance de chaque fonction permet d'obtenir sa criticité. La robustesse du PII est exprimée en termes de la criticité de défaillance de celui-ci, qui est obtenue à partir de l'agrégation des criticités de ses fonctions.

Mais, l'agrégation des criticités des fonctions ne prend pas en compte l'importance relative de différentes fonctions du plan et la performance est évalué qualitativement d'où l'importance d'évaluer les PII quantitativement.

I.5. Conclusion

Nous avons consacré ce chapitre à la présentation de l'état de l'art des Plans Internes d'Intervention afin de bien assimiler ce vaste domaine. Après avoir présenté le degré de gravité des événements, les différentes étapes du processus de gestion des urgences et des crises et la stratégie de réponse à l'urgence. Il était question de mettre l'accent sur les approches qui ont été développées pour évaluer la performance des PII en se basant sur des outils génériques qualitatifs tels que : Retour d'expérience REX, audits, approche FIS. Ces derniers présentent certaines limites quant à l'évaluation quantitative de leur performance en l'absence de méthodes d'analyse éprouvées.

Dans ce contexte, les réseaux de Petri (RdP) sont retenus comme outils de modélisation et d'analyse puissants et largement utilisés dans les études de sûreté de fonctionnement des systèmes à événement discret, en identifiant et insérant les indicateurs clé de performance comme données d'entrées nécessaires à la modélisation et à l'évaluation de la performance des systèmes de réponse à l'urgence. Donc, la modélisation de ces derniers au moyen des réseaux de Petri est une motivation majeure de ce travail de recherche. D'où l'objet du chapitre suivant qui présente les réseaux de Petri (RdP) comme outil de modélisation des systèmes complexes.

Chapitre 2

Réseaux de Petri : outil d'évaluation de la performance des systèmes complexes

II.1. Introduction

Les réseaux de Petri et la simulation de Monte Carlo sont aujourd'hui très répandus en sûreté de fonctionnement, mais il n'y a pas de travaux qui les utilisent pour évaluer la performance des systèmes de réponse à l'urgence.

Ce chapitre sera consacré à la présentation de la structure des réseaux de Petri, leurs évolutions et extensions, la simulation de Monte Carlo et l'outil MOCA–RP. Il apparaît clairement que la complexité des systèmes à représenter impose de structurer les modèles. Pour cela, nous aborderons une approche de structuration de la modélisation des systèmes complexes au moyen des réseaux de Petri. Finalement, l'identification des sources d'incertitude et leur manipulation par la méthode de simulation de Monte Carlo dans l'évaluation de la performance des systèmes complexes seront étudiées.

II.2. Réseaux de Petri

Les réseaux de Petri ont été développés en 1962 par Carl Adam Petri [Gu et Bahri, 2002]. Ils sont basés sur la théorie des automates. Plusieurs extensions des réseaux de Petri ont été élaborées pour répondre à la modélisation des problèmes spécifiques. Dans notre cas, leurs avantage est la possibilité d'analyser le comportement des systèmes de réponse à l'urgence. Cette modélisation dynamique permet d'obtenir des mesures en termes de fiabilité.

Les RdP permettaient de représenter une structure statique et une structure dynamique du système, d'associer le temps au modèle, d'intégrer des événements stochastiques, parallèles et asynchrones et de simuler à l'aide de la méthode de Monte Carlo [Mihalache, 2007].

II.2.1. Structures des réseaux de Petri

Un réseau de Petri est une notation graphique avec une structure mathématique sous-jacente adaptée pour modéliser des systèmes pilotés par les événements (systèmes à événements discrets) [Huang et Liang, 2004] et dans les études de sûreté de fonctionnement des systèmes dynamiques. Il peut être identifié comme un type particulier de graphe bipartite orienté qui contient deux parties statique et dynamique [IEC 61508, 2010; Blume et al., 2007; Hamzi et al, 2013]:

II.2.1.1. Structure statique

Elle comprend l'ensemble des places, transitions et arcs :

- **Places**, représentées graphiquement par des cercles ou des ovales, et peuvent être marquées par une ou plusieurs marques appelées jetons. L'ensemble des places sont des états de composants du système modélisé ;
- **Transitions**, représentées par des rectangles ou des bars et agissent, sous certaines conditions, sur le marquage du réseau. L'ensemble des transitions représente l'ensemble des événements dont l'occurrence provoque la modification de l'état du système. Les délais peuvent être attribués à des transitions (par exemple le temps nécessaire pour effectuer une tâche donnée) ;
- **Arcs**, représentés par des flèches qui lient une place à une transition (arc amont) ou inversement une transition à une place (arc aval). Un poids (entier positif) peut leur être affecté. Par défaut, il est égal à 1. Par exemple, le poids d'un arc amont peut indiquer les ressources nécessaires pour

réaliser une action donnée alors que celle d'un arc aval peut indiquer la quantité de la sortie résultant de cette action.

Mathématiquement, un réseau de Petri est décrit par (fig. II.1) [Dhouibi, 2005; Muller, 2010] :

$$R = <P, T, Pre, Post> \quad (1)$$

Où :

- $P = \{p_1, p_2, \ldots, p_i\}$, un ensemble fini et non vide de places;
- $T = \{t_1, t_2, \ldots, t_j\}$, un ensemble fini et non vide de transitions ;
- Pre: $P \times T \rightarrow N$ est l'application d'incidence avant;
- $Post$: $P \times T \rightarrow N$ est l'application d'incidence arrière.

On utilise également la notation :

$$W = Post - Pre \quad (2)$$

et W est en général appelée matrice d'incidence du réseau de Petri.

$P = \{p1, p2, p3\}$

$T = \{t1, t2\}$

$$Pre = \begin{Bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 1 \end{Bmatrix}$$

$$Post = \begin{Bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \\ 1 & 0 \end{Bmatrix}$$

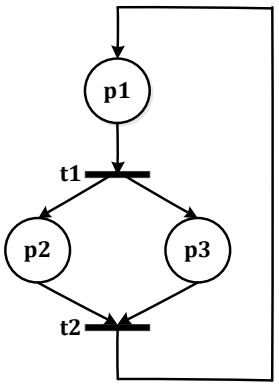


Figure II.1− Représentation mathématique d'un Réseau de Petri

II.2.1.2. Structure dynamique

Elle représente l'évolution du réseau de Petri et comprend :

- **Jetons**, représentés par des petits points solides. L'ensemble des jetons associés aux différentes places constitue le marquage de réseau de Petri et correspond à un état du système modélisé. L'évolution de ce marquage constitue de l'aspect dynamique du système. Un jeton peut, par exemple, représenter la présence ou l'absence d'une ressource;

- **Prédicats ou Gardes**, conditions à remplir pour que le délai de la transition puisse démarrer (condition de validation) ;
- **Affectations**, messages émis qui permettent la mise à jour des variables quand une transition est tirée.

Mathématiquement, un réseau de Petri marqué est le couple (fig II.2) :

$$N = <R, M> \quad (3)$$

Où :

- R est un réseau de Petri
- M est une application de marquage

$$M : P \rightarrow N \quad (4)$$

$M(p)$ est le nombre de marques (jetons) contenus dans la place p.

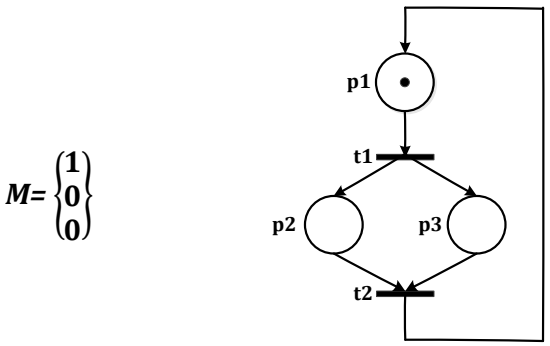


Figure II.2− Représentation mathématique du marquage d'un Réseau de Petri

II.2.2. Evolution d'un réseau de Petri

D'abord, il est utile de distinguer entre activation et franchissement d'une transition:

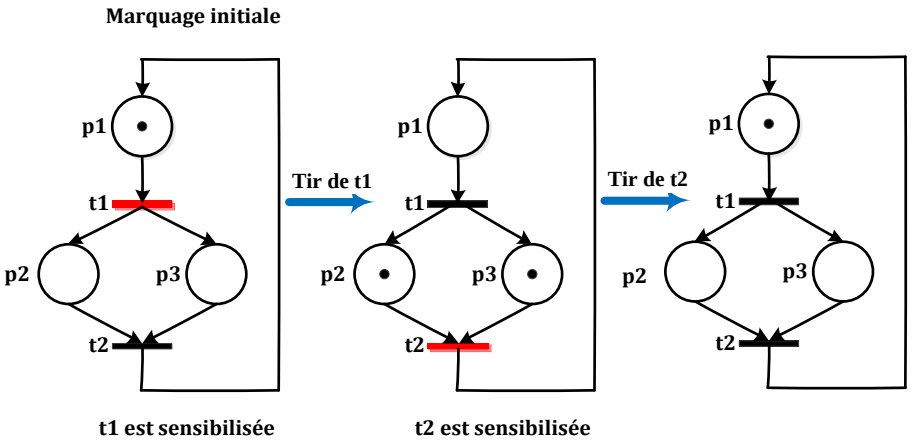
- Une transition est activée (valide ou sensibilisée) lorsque tous les places amont de la transition doivent posséder au moins le nombre de jetons requis par chaque arc amont (indiqué par son poids) et tous les prédicats doivent être « vrai ».
- Une transition est franchie lorsque toutes les conditions sont remplies (c'est à dire qu'elle est valide) et un délai requis est écoulé (durée de l'activation jusqu'à le franchissement). Ce délai peut être déterministe ou stochastique (délai aléatoire, par exemple exponentielle négative). Si aucun délai existent (délai = 0) alors le tir est instantanément.

L'évolution du réseau de Petri est obtenue par le franchissement de transitions qui affecte son marquage et change l'état du système, ce franchissement se déroule comme suit:

- Les places amont perdent un nombre de jetons égal au poids de l'arc amont.
- Places aval acquérir un nombre de jetons égal au poids de l'arc aval.
- Affectations sont mises à jour.

Mathématiquement, l'évolution du marquage est prédite par un calcul matriciel. Soit *S* un vecteur *M x 1* contenant pour chaque composante j le nombre de tirs de la transition *j*. Soit M_0, le marquage initial. L'évolution du marquage après les tirs des transitions s'exprime (fig II.3) [Muller, 2010] :

$$M=M0-Pre.S+Post.S \quad (5)$$



$\boldsymbol{M_0}=\begin{Bmatrix}1\\0\\0\end{Bmatrix}$(le marquage initial)

$\boldsymbol{S}=\begin{Bmatrix}1\\1\end{Bmatrix}$(t1 et t2 sont chacune tirée une fois)

$$\boldsymbol{M}=\begin{Bmatrix}1\\0\\0\end{Bmatrix}-\begin{Bmatrix}1&0\\0&1\\0&1\end{Bmatrix}.\begin{Bmatrix}1\\1\end{Bmatrix}+\begin{Bmatrix}0&1\\1&0\\1&0\end{Bmatrix}.\begin{Bmatrix}1\\1\end{Bmatrix}$$

$\boldsymbol{M}=\begin{Bmatrix}1\\0\\0\end{Bmatrix}$(le nouveau marquage après tir de t1 et de t2)

Figure II.3– Représentation mathématique de l'évolution du marquage d'un Réseau de Petri

A partir du marquage initial M_0, il est possible de déterminer une séquence de franchissements. Cette séquence est une suite de transitions qui sont franchissables successivement (sans autres franchissements de transitions) [René et Hassane, 1992]. Le franchissement de ces séquences conduit au passage d'un marquage à un autre, ce qui correspond au passage du système d'un état à un autre [Laronde, 2011].

L'ensemble des marquages accessible à partir d'un marquage initial représente le graphe de marquage de la figure II.4 associé au réseau de Petri de la figure II.1.

$$\begin{pmatrix}1\\0\\0\end{pmatrix}\underset{\overleftarrow{t2}}{\overrightarrow{t1}}\begin{pmatrix}0\\1\\1\end{pmatrix}$$

Figure II.4− Graphe de marquage

Ce graphe de marquage est composé de nœuds qui correspondent aux marquages accessibles, et d'arc correspondant aux franchissements de transitions faisant passer d'un marquage à un autre. Il nous aidera à déterminer la matrice d'incidence $W_{m\times n}$ équivalente au réseau de Petri (m correspond au nombre de places et n au nombre de transitions) qui s'écrit de la manière suivante :

$$W = W^+ - W^- = [w_{ij}] \tag{6}$$

$$\begin{cases} W^+ = [w_{ij}^+] = [Post(p_i, t_j)] \\ W^- = [w_{ij}^-] = [Pre(p_i, t_j)] \end{cases} \tag{7}$$

En considérant l'exemple de réseau de Petri traité dans la figure II.1, les matrices d'incidences avant et arrière s'écrivent :

$$W^-=\begin{pmatrix}1 & 0\\0 & 1\\0 & 1\end{pmatrix} \qquad W^+=\begin{pmatrix}0 & 1\\1 & 0\\1 & 0\end{pmatrix} \tag{8}$$

La matrice d'incidence W est de la forme :

$$W=\begin{pmatrix}-1 & 1\\1 & -1\\1 & -1\end{pmatrix} \tag{9}$$

II.2.3. Extensions des réseaux de Petri

Parmi les extensions des RdP, on peut citer [Laronde, 2011]:

- **Les réseaux de Petri temporisés** sont obtenus à partir des réseaux de Petri classique lorsque des durées sont associées aux places (réseaux de Petri P-temporisés) ou aux transitions (réseaux de Petri T-temporisés).
- **Les réseaux de Petri stochastiques** sont obtenus à partir des réseaux de Petri classiques en associant des durées de franchissement aléatoires aux transitions (en utilisant la loi exponentielle ou la loi de Weibull, par exemple).
- **Les réseaux de Petri Stochastiques Généralisés (RDPSG)** permettent de prendre en compte, en plus de transitions avec des lois exponentielles, d'autres transitions dites immédiates tirées sans délai et qui sont prioritaires par rapport aux transitions à délai aléatoire.
- **Les réseaux de Petri Stochastiques et Déterministes (RdPSD)**. Dans ces RdPSD, les délais associés aux transitions temporisées suivent des lois de distribution exponentielle ou autre et certaines transitions sont immédiates.

II.2.4. Simulation de Monte Carlo

La simulation de MC est un outil numérique basé sur le tirage au sort de nombres aléatoires. La quantité que l'on désire estimer correspond à l'espérance mathématique d'une variable aléatoire, évoluant selon un processus stochastique. L'estimation est obtenue en moyennant les résultats collectés lors d'un grand nombre d'histoires simulées du système. Afin de voir apparaître un événement redouté (rare en générale) un nombre suffisant de fois, on doit faire un grand nombre de simulations, ce qui implique des temps de calcul important [Veach, 1997; Dubi, 2000; Niel et Craye, 2002]. De nombreuses techniques d'accélération de la simulation permettent de réduire ces temps. Elles sont basées soit sur une diminution de la complexité du modèle, soit sur la réduction du nombre de scénarios à simuler, en favorisant l'apparition des événements rares. Toutefois, ces méthodes ne sont pas toujours faciles à mettre en œuvre, car elles impliquent des hypothèses assez fortes et/ou ne fournissent pas forcement des estimateurs de qualité [Dubi, 2000].

La simulation de MC se prête particulièrement aux études de fiabilité dynamique étant donné le caractère stochastique naturel du problème étudié. Selon [Labeau et al., 2000; Smidts et Devooght, 1992; Marseguerra et al., 1998; Cabarbaye et Laulheret, 2005], cet outil de résolution s'avère peu sensible aux dimensions du problème, ce qui est un avantage précieux.

On peut effectuer une simulation de MC à partir d'un grand nombre de modèles comportementaux (automates d'états, réseaux de Petri, arbres de défaillance…) pour la résolution d'un problème de fiabilité prévisionnelle.

II.2.5. Réseaux de Petri et Logiciel MOCA-RP (SatoDev)

Les réseaux de Petri complexe ne peuvent pas être résolus à l'aide des approches analytiques. D'où le besoin d'une approche de simulation du comportement des systèmes dynamiques complexes. La simulation de Monte-Carlo est considérée comme un mécanisme susceptible de sortir des nombres au hasard. Cette approche est très intéressante si elle est couplée avec un outil dont le formalisme permet de représenter le système étudié. C'est l'approche retenue par les concepteurs de MOCA-RP [Chorier, 2007].

Le logiciel MOCA-RP (**MO**nte **CA**rlo basé sur les **R**éseaux de **P**etri) est destiné à la simulation du comportement des systèmes dynamiques complexes dans le but d'obtenir, par un traitement statistique, des résultats concernant leur fiabilité, leur disponibilité, ou leur productivité, ainsi que tout autre paramètre probabiliste. Le modèle du système à étudier est réalisé sous la forme d'un réseau de Petri stochastique interprété qui sert de support à une simulation de Monte Carlo classique.

Pour un paramètre X simulé donné, les statistiques de base permettent de calculer la moyenne (eq.10), la variance (eq.11) et l'intervalle de confiance (eq.12) de l'échantillon (Xi) qui a été simulé en prenant en compte les problèmes de précision de calcul qui sont engendrés par un nombre de simulations toujours plus important:

$$\bar{x} = \sum_i^n x_i / n \tag{10}$$

$$\sigma^2 = \sum_i^n (x_i - \bar{x})^2 / n) \tag{11}$$

$$IC = \left[X - E.\left(\sigma / \sqrt{n}\right).\bar{X} + E.\left(\sigma / \sqrt{n}\right)\right] \tag{12}$$

Ou E=1.6449 pour une confiance=90%

II.2.5.1. Lois de transition

MOCA-RP gère des lois de transition variées, à chaque transition du réseau de Petri est attachée :

- la loi de distribution du délai de tir de cette transition c'est-à-dire le délai qui s'écoule entre l'instant de la validation et l'instant du tir effectif.
- la loi de tir de cette transition, c'est-à-dire la manière dont sera tirée la transition

II.2.5.1.1. Loi de délai

La loi, qui permet de spécifier le délai au bout duquel la transition valide sera tirée, est spécifiée après le mot-clef LOI. Nous listons ici l'ensemble des lois utilisées durant ce mémoire ainsi que leurs paramètres.

- drc δ est la loi de Dirac de délai δ;

Tableau II.1− Loi Dirac et ses caractéristiques [Philippe, 2011]

Densité	Distribution de DIRAC correspondant à un délai déterministe égal à δ
Paramètres	δ = délai au bout duquel la transition est tirée à partir du moment où elle est devenue valide
Simulation	d = δ

- nlog m, e est la loi log-normale de moyenne m et de facteur d'erreur e ;

Tableau II.2− Loi log-normale et ses caractéristiques [Philippe, 2011]

Densité	$f(d') = \frac{1}{\acute{d}.\, b\sqrt{2\pi}} e^{\frac{-[LN(\acute{d})-a]^2}{2b^2}}$
Paramètres	m = moyenne = E(d); q = facteur d'erreur à 5%.
Pré-calcul	$b = \frac{LN(q)}{1.64}$ Pour un facteur d'erreur à 5%, la valeur de Ua est égale à 1.64 (valeur provenant des tables relatives à la loi normale) ce qui permet de définir un intervalle de confiance à 90% (5% de chaque côté). $a = LN(m) - \frac{b^2}{2}$
Simulation	Z1, Z2 tirés au hasard et équirépartis entre 0 et 1; $d' = [-2\ LN(Z1)]^{1/2}.\cos(2\ p\ Z2)$ (Distribution normale réduite); d = exp (b.d' + a) (Distribution log-normale).

- unif min,max est la loi uniforme de minimum min et de maximum max ;

Tableau II.3− Loi uniforme et ses caractéristiques [Philippe, 2011]

Densité	f(d) uniforme entre δ1 et δ2.
Paramètres	δ1 = Borne inférieure du délai δ2 = Borne supérieure du délai
Simulation	Z tiré au hasard est équiréparti entre 0 et 1 ; d = (δ2 - δ1);Z + δ1. (distribution uniforme)

II.2.5.1.2. Loi de tir

La loi de tir permet de spécifier la manière de tirer la transition. Une défaillance peut avoir lieu lorsqu'une ressource est sollicitée pour changer l'état d'attente à un autre état de fonctionnement. La probabilité γ de défaillance à la sollicitation est le nombre de chances de voir cette ressource refuser de fonctionner lorsqu'on la sollicite. La représentation de ce phénomène en réseau de Petri ne respecte pas la règle de franchissement d'une transition de réseau de Petri classique parce que dans le cas de tirage de ce type de transition spécifique à MOCA-RP (Loi de tir à la sollicitation), une transition ayant deux arcs avals, l'un menant vers le changement d'état, l'autre vers un état de panne. Mais, lorsque la transition est tirée, seul un des deux arcs avals transmet un jeton dans sa place avale (l'autre en transmet zéro) et ceci avec une fréquence égale à γ pour la place représentant la défaillance à la sollicitation et (1- γ) pour la place représentant la non-défaillance lors de la sollicitation (fig II.5) [Philippe, 2011; Chorier, 2007].

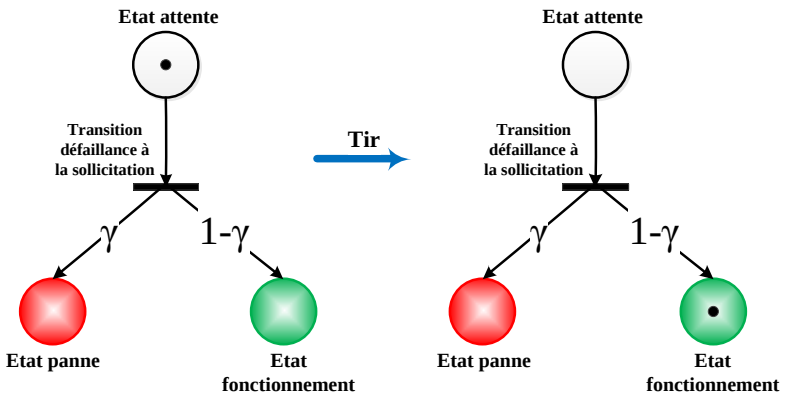


Figure II.5− Règle de tir de la transition avec loi dite « défaillance à la sollicitation » [Chabot, 1998]

II.2.5.2. Syntaxe des expressions et messages

L'ensemble des expressions et messages inclus dans MOCA-RP sont présentées dans les paragraphes suivants:

II.2.5.2.1. Expressions

La syntaxe des expressions numériques et booléennes pouvant être utilisées pour les gardes, affectations et états statistiques du réseau est donnée comme suit:

Les expressions numériques sont formées à partir des variables et constantes numériques (c.-à-d. entières ou réelles) et des opérateurs +, - (binaire), - (unaire), *, /, #, des parenthèses et de fonctions mathématiques. Une expression numérique peut être :

- une constante entière ou réelle ;
- une variable entière ou ;
- un nombre entier ou réel ;
- #i (où i est un entier > 0) qui est égale au marquage de la place numéro i du réseau ;
- Les opérations arithmétiques usuelles e1+e2, e1-e2, e1*e2 et e1/e2 (où e1 et e2 sont deux expressions du même type c'est à dire soit entières, soit réelles) ;
- unif(e1,e2) (où e1 et e2 sont deux expressions réelles constantes) est un générateur de nombres aléatoires suivant une distribution uniforme dans l'intervalle [e1,e2];
- nlog(m,e) (où m et e sont deux expressions réelles constantes) est un générateur de nombres aléatoires suivant une distribution lognormale centrée en la valeur moyenne m et se trouvant avec une probabilité de 90% dans l'intervalle [m/e, m*e];

Les expressions booléennes formées à partir des variables et constantes booléennes (vrai et faux), des parenthèses et des opérateurs |, ou, &, et, !, non, ==, !=, <, >, <=, >= et @. Une expression booléenne peut être :

- une constante booléenne;
- une variable booléenne;
- une des constantes vrai ou faux ;
- e1 | e2, e1 ou e2 (où e1 et e2 sont des expressions booléennes) est le OU logique de e1 et e2 ;
- e1 & e2, e1 et e2 (où e1 et e2 sont des expressions booléennes) est le ET logique de e1 et e2 ;

- !expr, non expr (où expr est une expression booléenne) est le NON logique de expr ;
- les opérateurs d'égalité et d'inégalité usuels e1 == e2, e1 != e2, e1 < e2, e1 > e2, e1 <= e2, e1>= e2 (où e1 et e2 sont deux expressions numériques du même type ; c'est à dire soit entières, soit réelles) ;
- @(i) (e1, ..., en) (où i est un entier positif et e1, ..., en sont des expressions booléennes) vaut vrai si au moins i des e1, ..., en valent vrai ;

II.2.5.2.2. Messages

La syntaxe des messages émis et reçus est donnée.

- ! Introduit une liste d'affectations de variables (les affectations ont lieu lorsque la transition est franchie) et consistent en une liste de couples (variable, expression) séparés par des virgules;
- ? Spécifie une liste d'expressions booléennes qui doivent être nécessairement vérifiées pour que la transition soit valide. Ces expressions sont séparées par des virgules.

II.3. Démarche structurée de modélisation des systèmes complexes au moyen des RdP

Les différents systèmes complexes requiert un travail de modélisation personnalisé afin d'intégrer leurs caractéristiques spécifiques et développer un modèle associé en basant sur la démarche de structuration.

La dissociation du processus représentatif de la dynamique du système est intéressante pour évaluer globalement leur performance. Afin de procéder à cette différentiation, Pérès a fait apparaître le concept de couches de modélisation [Pérès et al., 2007].

- Couche structurelle, représentative des moyens : ressources ou acteurs, du système principal et du système de soutien ;
- Couche opérationnelle, caractéristique de l'ensemble des activités mises en œuvre par le système et de ses interactions avec le milieu extérieur pendant sa vie utile ;
- Couche d'évaluation qui ne traduit pas un aspect physique ou comportemental du système mais elle évalue leur performance.

La décomposition en couches apparaît comme insuffisante. Une décomposition supplémentaire est nécessaire au sein des couches structurelle et opérationnelle. Ceci conduit à introduire la notion de modules.

La modification de ce dernier peut donc se faire sans remettre en cause le reste du modèle. Le gain en souplesse de modélisation est ainsi très important. Le degré d'intelligibilité du modèle se trouve également renforcé par la modularité puisque le découpage correspond à une articulation logique du comportement du système.

Nous décrivons à la suite les couches structurelle et opérationnelle ainsi que les modules qui leurs sont attachés.

II.3.1. Couche structurelle et les modules associés

La couche structurelle traduit le comportement dysfonctionnel du système global en se limitant à tout ce qui lui est intrinsèque. Elle permet :

- d'une part de représenter l'ensemble des ressources ;
- d'autre part de déterminer leur état: marche/panne pour des ressources réparables comme les composants du système principal ou disponible/indisponible pour les acteurs et les ressources consommables.

Cette couche met en jeu des paramètres déterministes mais aussi stochastiques puisqu'elle intègre les aspects probabilistes liés à l'occurrence des défaillances. Pour assurer la représentation exhaustive de tous les moyens, cette couche reprend la structure physique du système.

La Couche Structurelle utilise deux classes de modules [Pérès et al., 2007]:

- Les Modules Physiques : ils déterminent l'état des composants élémentaires du système principal (attente, marche, panne, etc.).
- Les Modules de Synthèse : ils établissent l'état des sous-ensembles, à partir des données de sortie des Modules Physiques.

II.3.1.1. Modules physiques

Chaque module physique caractérise l'état de fonctionnement du composant élémentaire à partir de trois places : élément en état de marche nominal, en attente de réparation ou en réparation (fig. II.6).

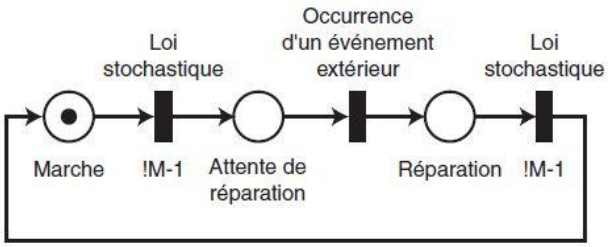


Figure II.6− Représentation d'un module physique [Pérès et al., 2007]

Le tir de la transition entre les places marche et attente de réparation correspond à l'occurrence d'une défaillance. Cette transition est donc associée à une loi stochastique (distributions exponentielle, Weibull, Normale, … etc.).

Le passage de l'état attente de réparation à l'état réparation se fait lorsque les conditions nécessaires à l'opération de soutien sont toutes réunies. Ces conditions ne sont pas régies par des lois.

La notion de messages émis (!M) et reçus (?M) par les transitions est spécifique au logiciel Moca-RP que nous avons utilisé. Cette astuce de modélisation permet de synchroniser des sous-réseaux indépendants. Les messages reçus participent, lorsqu'ils sont « vrais »à la validation de la transition lorsqu'elle est tirée ; les messages émis le sont dans l'état « vrais ». La symbolique utilisée est telle qu'un message est affecté d'un nombre positif lorsqu'il est vrai et d'un nombre négatif lorsqu'il est faux. L'émission de ces messages et la gestion de ces places sont effectuées dans la couche opérationnelle.

L'ensemble de ces messages renseigne sur l'état des modules physiques. Ces informations sont alors reprises au niveau des modules de synthèse, qui vont maintenant être présentés.

II.3.1.2. Modules de synthèse

Les modules de synthèse permettent de réunir des modules physiques ou de modules de synthèse du niveau inférieur afin de déterminer le fonctionnement global des sous-systèmes.

Il n'existe pas de structure de référence pour les modules de synthèse. En effet, la diversité des cas envisageables rend toute généralisation délicate. Nous limitons donc notre propos à la présentation d'un exemple: la modélisation d'une redondance active.

Considérons une redondance active de deux composants représentés chacun par un module physique. Lorsque l'un des deux est défaillant, la fonction assurée par le sous-ensemble qu'il représente reste remplie (sous-ensemble en état de « marche »). Ce n'est que lorsque les deux composants sont en panne, que la perte de la fonction est observée (sous-ensemble en état de « panne »). Le sous-ensemble est donc modélisé par une boucle composée de deux places (Fig. II.7), marche et panne, et de deux transitions. La transition marche vers panne est associée à une loi de dirac de paramètre 0 car le tir de la transition ne dépend pas du temps mais de l'état des deux composants. La condition de franchissement est que les messages 1 et 2 soient faux : ?M-1-2 (c'est-à-dire panne du composant 1 et panne du composant 2). II y a alors émission du message 3 à faux qui signifie que la fonction n'est plus remplie.

De façon identique, la condition de franchissement de la transition panne vers marche est que le message 1 ou 2 soit vrai : ?M1 ou 2 (c'est-à-dire marche du composant 1 ou marche du composant 2). II y a alors émission du message 3 à vrai signifiant le retour à l'état de marche de la fonction.

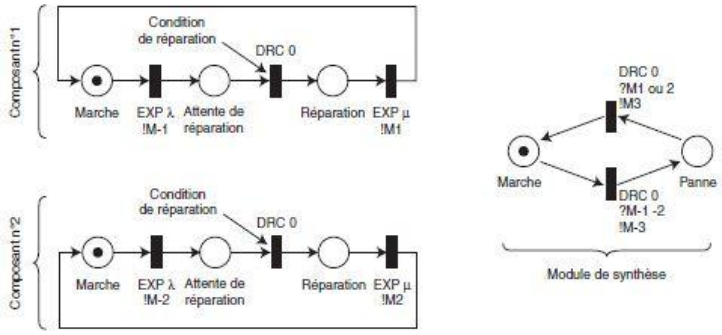


Figure II.7− Représentation du module de synthèse [Pérès et al., 2007]

II.3.2. Couche opérationnelle et les modules associés

La couche opérationnelle traduit en fait le comportement fonctionnel du système global. Elle permet d'une part de représenter exhaustivement l'ensemble des activités, éventuellement regroupées en processus et d'autre part de coordonner ces activités entre elles et d'évaluer les effets de leur réalisation sur le système global.

Cette couche utilise deux classes de modules [Pérès et al., 2007] :

- les modules activités ;
- les modules contextuels.

II.3.2.1. Modules activités

En préliminaire à toute modélisation, le modélisateur doit établir une liste des activités à représenter et identifier, pour chacune d'elles, les ressources, acteurs ou informations nécessaires à sa réalisation. Ces entrées peuvent venir des modules physiques ou de synthèse de la couche structurelle.

À chaque activité, est associé un module dit module d'activité constitué d'un ou plusieurs réseaux de Petri stochastiques. L'objectif est que ces réseaux restent suffisamment simples pour être facilement appréhendables par le modélisateur.

II.3.2.2. Les modules contextuels

L'utilisation de ce type de modules concerne la prise en compte de phénomènes susceptibles d'affecter le fonctionnement normal du système, en fonction de leur nature, les modules contextuels seront susceptibles de mettre en jeu des modules physiques, de synthèse et d'activités.

II.3.2.3. Communication entre les couches

Les deux couches et l'ensemble des modules qui les constituent sont en perpétuelle interaction et doivent échanger des flux de ressources, d'informations et d'actions.

Pour les flux de ressources, ces échanges sont principalement représentés par des flux de jetons grâce à l'utilisation de places dites en partage de ressources. Chaque jeton représente le moyen en tant que tel. Les modules devant échanger ont en commun cette place partagée. L'ajout ou le retrait de jeton dans cette place par l'un ou l'autre des modules représente la mobilisation, la consommation ou la sollicitation de la ressource échangée.

Pour les flux d'informations et d'action, ces échanges sont principalement représentés par des messages booléens. À chaque message est associée une information. II appartient au modèle de faire vivre ce message en le mettant à vrai ou à faux suivant les situations rencontrées. Les messages ont la caractéristique intéressante de ne pas avoir de destinataire identifié, et peuvent être reçus par n'importe quel module. Leur utilisation nécessite en revanche, pour se prémunir de nombreuses difficultés, de tenir à jour une liste de tous les

messages utilisés, avec leur signification et leur valeur initiale. Remarquons également que l'excès de message peut conduire à une difficulté liée à un découplage excessif des phénomènes rendant là encore l'interprétation et la manipulation des modèles délicates.

Cette distinction entre échanges de moyens et échange d'informations est, il faut le reconnaître, restrictive et doit être considérée comme indicative. Si un message booléen n'est pas suffisant pour représenter une information, il est possible d'utiliser des places auxiliaires en lecture seule ou en lecture écriture, où le nombre de jetons dans la place est porteur de l'information.

II.3.3. Couche d'évaluation

Les données figurent dans les fichiers résultats de simulation du modèle constitués des couches structurelles et opérationnelles mesurent la performance du système. Ces résultats doivent faire apparaître l'estimation des différents indicateurs de performance du système. Ils sont alors remis aux décideurs qui peuvent faire leur choix en toute connaissance de conséquences.

II.4. Propagation de l'incertitude dans l'évaluation de la performance des systèmes complexes

La plupart des auteurs s'accordent pour distinguer deux types d'incertitudes dans le domaine de l'analyse des risques [LeDuy, 2011] :

Les **incertitudes aléatoires** concernent les événements ou les phénomènes dont l'occurrence est considérée comme aléatoire ou stochastique. Elles sont souvent liées aux quantités observables) [Winkler, 1996].Une autre terminologie «variabilité» (« variability» en anglais) est également utilisé pour désigner ce type d'incertitude [Stamatelatos, 2002].

Les **incertitudes épistémiques**, elles sont associées à des quantités non observables [Winkler, 1996]. En théorie, elles peuvent être réduites voire éliminées par l'acquisition de connaissances supplémentaires. Selon la définition de Hofer [Hoeting, 1999], l'incertitude aléatoire apparaît du fait que nous ne pouvons pas donner une valeur unique à un événement aléatoire, mais plutôt une distribution de valeurs associées à des probabilités. L'incertitude épistémique est caractérisée comme une incertitude due au manque de connaissance sur des valeurs constantes mais mal connues [LeDuy, 2011].

II.4.1. Identification des sources d'incertitude

Il faut d'abord identifier les sources d'incertitudes épistémiques et aléatoires à traiter dans l'évaluation de la performance des systèmes complexes.

II.4.1.1. Incertitudes aléatoire

Dans la structure des systèmes complexes, l'occurrence des défaillances des composants a un caractère aléatoire. La défaillance de l'un des composants lors de fonctionnement du système pourrait entraîner des conséquences vastes et dramatiques. Ces échecs peuvent être une action inappropriée d'opérateur, la non-réponse des équipements à la demande, mauvaise décision… etc. Ces événements influent sur la performance du système et font son succès incertain.

II.4.1.2. Incertitudes épistémiques

Les incertitudes épistémiques sont classées en trois types d'incertitudes: les incertitudes paramétriques, les incertitudes de modèle, les incertitudes de complétude.

II.4.1.2.1. Incertitudes paramétriques

Ce sont des incertitudes liées aux données d'entrée du modèle. Pour évaluer leur performance, le modèle du système complexe intègre un nombre important de données correspond aux données de fiabilité des différents composants de ces systèmes ou de fiabilité humaine. Ces données fait l'objet de travaux du calcul d'incertitudes.

Les incertitudes paramétriques peuvent résulter des différentes origines suivantes comme l'insuffisance des données observées (REX), l'erreur (biais) de mesure, l'avis d'expert.

Les données issues du REX permettent d'estimer les paramètres. En théorie il faut un nombre infini de données observées afin que l'estimation du paramètre puisse être considérée comme dénuée d'erreur. Comme ceci est impossible en pratique il en résulte la présence d'incertitudes paramétriques sur les paramètres estimés.

En cas d'absence de REX, le recours aux avis d'experts est nécessaire. Pour les paramètres liés aux fiabilités humaines, les incertitudes sont notamment évaluées par jugement d'expert. Dans ces cas, les valeurs proposées par les experts comportent un certain nombre d'incertitudes à prendre en compte.

Dans les systèmes complexes, les incertitudes paramétriques sont

actuellement exprimées sous forme de facteurs d'erreur ou d'intervalles de confiance à 90%.

II.4.1.2.2. Incertitudes de modèle

Ce sont des incertitudes résultant de simplifications, d'hypothèses liées à un manque de connaissance sur un système, une structure, le comportement de composants dans des conditions variées pendant le développement d'un accident. Dans les systèmes complexes, les incertitudes de modèle peuvent être très nombreuses et touchent différentes parties du modèle.

La simplification du modèle entraîne une incertitude relative au modèle utilisé. Par contre, l'incertitude relative au modèle détaillé est effectivement réduite, cependant les analystes peuvent devoir faire face à deux nouveaux problèmes : le coût de la complexité du modèle (outil, temps de calcul...) et l'augmentation des incertitudes paramétriques. En effet, d'un côté le modèle détaillé s'approche du modèle correct mais d'un autre côté il y introduit des paramètres d'entrées supplémentaires d'où l'augmentation des incertitudes paramétriques.

II.4.1.2.3. Incertitudes de complétude

Elles sont liées à la couverture du modèle du système. En effet, les systèmes complexes présentent des limites en termes d'exhaustivité qui concernent le domaine couvert comme par exemple, l'absence de traitement de certaines agressions internes et externes. Comme les incertitudes liées aux hypothèses de simplification, elles ne sont pas prises en considération.

II.4.2. Manipulation de l'incertitude par la méthode de simulation de Monte Carlo

L'évaluation de l'incertitude donne la confiance aux résultats du modèle [EPA, 2009]. Il peut être réalisé au moyen de différentes approches en fonction du niveau d'incertitude associé à des paramètres considérés comme La méthode de simulation de Monte Carlo, approche basée sur les ensembles flous, théorie des fonctions de croyance…etc (fig II.8) [Buratti et al., 2012; Aven et Zio, 2011]. La méthode de simulation de Monte Carlo a devenu la norme pour la propagation des incertitudes dans l'industrie [Stamatelatos, 2002].

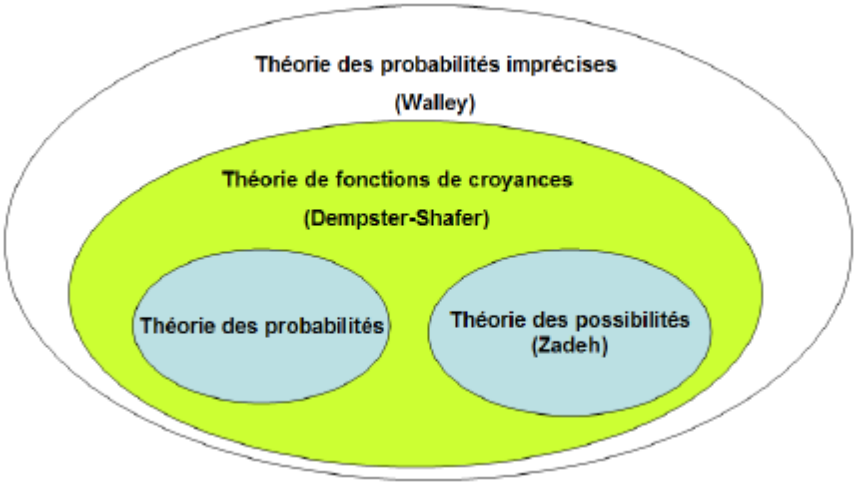


Figure II.8 : Principales méthodes de modélisation des incertitudes [LeDuy, 2011]

Pour illustrer la prise en compte simultanée des incertitudes aléatoires et épistémiques, les auteurs ont utilisé la simulation de Monte Carlo à 2-niveaux [Durga et al., 2007]. Dans la boucle intérieure, le temps de défaillance et le temps de réparation (incertitudes aléatoires) ont été échantillonnés jusqu'à la durée de mission. Dans la boucle extérieure, les incertitudes paramétriques relatives aux données ont été modélisées par des lois log-normales. Les résultats sont représentés sous forme d'une famille de fonctions de répartition probabilistes dont l'étalement représente l'incertitude épistémique. Chaque fonction de répartition probabiliste représente l'incertitude aléatoire en fonction du temps de défaillance à la sollicitation.

Ses principales étapes sont brièvement décrites comme suit [Innal et al., 2014]:

1. Construction d'une fonction de densité de probabilité pour chaque paramètre d'entrée. Dans le contexte des systèmes de réponse à l'urgence, les paramètres d'entrée peut inclure la probabilité de défaillance à la sollicitation, la disponibilité des équipes d'intervention et la durée de réalisation des actions de réponse à l'urgence. les distributions de probabilité peuvent être choisis en fonction de l'état de connaissances sur la valeur des paramètres, par exemple: uniforme, triangulaire, normale, log-normale, Chi-carré, bêta, gamma, etc
2. Générer un jeu de paramètres d'entrée à l'aide des nombres hasards (répartis uniformément entre 0 et 1) selon les fonctions de densité de probabilité affectées à ces paramètres.
3. Quantifier la fonction de sortie à l'aide de l'ensemble de valeurs

aléatoires. La valeur obtenue est une réalisation d'une variable aléatoire (X). Il convient de noter que cette quantification nécessite à son tour une simulation de Monte Carlo.

4. Répétez les étapes 2 à 3 n fois (jusqu'à ce qu'un nombre suffisant, par exemple 1000) produisant n valeurs de sortie indépendantes. Ces n valeurs de sortie représentent un échantillon aléatoire de la distribution de probabilité (distribution empirique) à la sortie de la fonction. On notera que le nombre total des antécédents de Monte Carlo n'est pas égal à n, puisque le processus (résultant de la quantification de la propagation de l'incertitude) représente une double boucle de Simulation Monte Carlo.
5. Générer des statistiques de l'échantillon obtenu pour le résultat de la sortie: moyenne, écart type, intervalle de confiance… etc.

II.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté dans un premier temps, les réseaux de Petri, la simulation de Monte Carlo et l'outil MOCA-RP. Dans un deuxième temps, nous avons abordé une approche structurée de modélisation de systèmes complexes via les réseaux de Petri. Dans un troisième temps, une distinction entre les incertitudes aléatoires et les incertitudes épistémiques a été faite et la propagation de l'incertitude dans le comportement des systèmes complexes par la méthode de Monte Carlo a été étudiée. Dans le chapitre suivant, nous appliquons cet outil d'évaluation sur le Plan interne d'intervention (PII) de l'entreprise SONATRACH DP Hassi R'mel.

Chapitre 3

Évaluation de la performance du Plan Interne d'Intervention (PII) SH/DP/HRM au moyen des réseaux de Petri

III.1. Introduction

Un système efficace de réponse à l'urgence est indispensable pour limiter les dégâts engendrés en cas de survenance d'un accident industriel majeur. Dans cette optique, les plans internes d'intervention (PII) sont des outils de planification et disposition réglementaire adaptés en intégrant à la fois des aspects humains, techniques et organisationnels d'une manière cohérente.

A cet effet, l'analyse à priori des indicateurs de performance dudit système (efficacité, temps de réponse, niveau de confiance NC,….), est une étape importante pour améliorer leur performance opérationnelle et tactique.

Le présent chapitre a pour objectif la mise en œuvre d'outils de sûreté de fonctionnement les plus adaptés, pour analyser et évaluer quantitativement la performance du système de réponse à l'urgence de l'entreprise Sonatrach DP Hassi R'Mel, en modélisant et analysant le comportement dynamique du système au moyen du logiciel MOCA-RP.

Egalement, une étude exploratoire des documents Etude de danger (EDD) et Plan Interne d'Intervention (PII) de Sonatrach DP Hassi R'Mel a permis de retenir le scénario le plus représentatif (dit enveloppe) : Perte de confinement de GPL- Ballon 42-D108, Module Processing Plant MPP4.

III.2. Présentation du site d'étude

Le champ gazier d'Hassi R'mel se situe dans une région désertique. Son activité principale est l'exploitation des gisements de gaz et de pétrole. Les risques majeurs sont le risque incendie et le risque explosion. Les principaux produits pris en compte dans le cadre du Plan Interne d'Intervention sont méthane, Ethane, Propane, n-Butane, GPL, Gasoil, Essence, Pétrole brut, Inhibiteur de corrosion et Glycol. Seule la ville de Hassi R'mel se trouve à proximité des installations de la zone de production centre de la région de Hassi R'mel.

L'identification des risques et leur évaluation ont été réalisées dans le cadre de l'Etude De Dangers (EDD) des sites d'Hassi R'mel [DNV, 2010]. La conception des Plans Internes d'Intervention des sites d'Hassi R'mel est en accord avec le dernier décret 09-335 [JORADP, 2009] et le standard Sonatrach issu du projet ICS [DC HSE, 2007].

III.3. Approche d'évaluation de la performance des PII

Face à la complexité du système de réponse à l'urgence (combinaison de différents éléments du plan : acteurs impliqués, moyens déployés, processus informationnel et décisionnel, ….), l'adoption d'une approche structurée qui tient compte les interactions entre ces éléments est plus qu'une nécessité. L'approche structurée proposée par F. Pérès [Pérès et al., 2007] permet de tenir compte la notions des couches d'ordres structurels, opérationnels et d'évaluation.

Ces couches sont présentées brièvement comme suit :

III.3.1. Couche Structurelle

La couche structurelle permet de modéliser l'attribution des ressources nécessaires lors d'une situation d'urgence. Ces ressources sont représentées par de modules physiques, d'où l'évolution de leurs états suit la loi de tir à la sollicitation.

L'agrégation des modules physiques précédemment cités est modélisée par un ensemble de variables qui sont appelées modules de synthèse.

La figure III.1 présente le réseau de Petri du module physique des ressources.

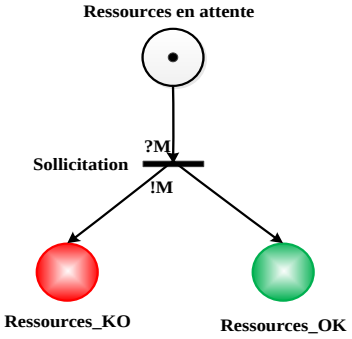


Figure III.1− Module physique des ressources

III.3.2. Couche opérationnelle

La couche opérationnelle assure la dynamique des éléments physiques du système. Elle représente et coordonne les activités du système (action d'urgence). F. Pérès [Pérès et al., 2007] a proposé les modules suivants pour cette couche :

III.3.2.1. Modules activités

L'intervention face aux accidents industriels nécessite une série d'action d'urgence (activité). A chaque activité identifiée, on peut associer un ou plusieurs modules physiques.

C'est pourquoi, et comme besoins de notre étude, une liste exhaustive des activités principales a été arrêtée : Signalement d'alerte, intervention opérationnelle, intervention incendie/sauvetage & secourisme,….

La figure III.2 présente un module activité généralisé.

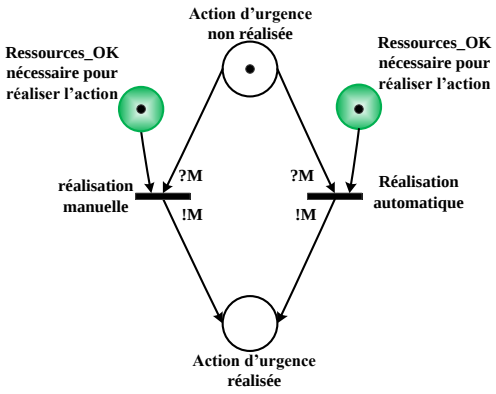


Figure III.2− Module activité

III.3.2.2. Modules contextuels

Ils modélisent des phénomènes dangereux susceptibles d'affecter l'état normal du système. Ces phénomènes se résument dans la perte de l'intégrité physique, le développement et l'escalade de l'événement redouté.

III.3.3. Couche d'Évaluation :

Cette phase permet d'évaluer la performance du système de réponse à l'urgence en disposant les indicateurs les plus pertinents (efficacité, temps de réponse, niveau de confiance,…).

La démarche proposée dans cette étude, constitue un modèle d'aide à la décision pour améliorer durablement la performance du système de réponse à l'urgence.

III.4. Application au Plan Interne d'Intervention PII SH/DP/HRM:

Une étude exploratoire des documents Etude de Danger (EDD) [DNV, 2010] et Plan Interne d'Intervention (PII) [DNV, 2011] de Sonatrach DP Hassi R'Mel a permis de retenir un scénario représentatif (enveloppe) : Perte de confinement de GPL- Ballon 42-D108, MPP4.

III.4.1. Description de l'événement redouté

L'événement redouté (ER) est une perte de confinement d'une quantité importante du GPL- ballon D108, dont le scenario étudié présente un modèle séquentiel d'incident (perte de confinement, dispersion de nuage, inflammation,…etc.). Les phénomènes dangereux redoutés sont: un feu de chalumeau, un feu de flaque et un feu de nuage dans le cas d'ignition retardée et/ou une explosion retardée (VCE).

Le sous-système concerné de l'installation est représenté par la figure ci-dessous.

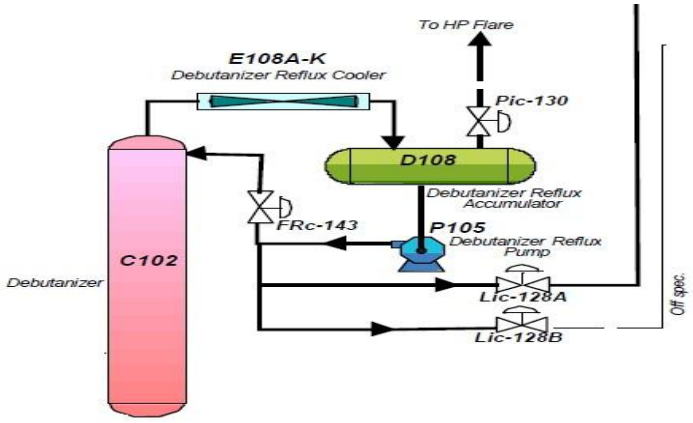


Figure III.3− Nœud reflux débutaniseur

Le débutaniseur (C102) permet de récupérer le gaz en tête (propane C3 et butane C4) et le condensat (C5+) en fond de colonne. Le rebouillage est assuré par un four (H102). Le reflux passe quant à lui par un aéroréfrigérant (E108) et un ballon de reflux (D108). La pompe (P105) permet d'envoyer une partie du contenu liquide du ballon comme reflux et comme GPL produit On spec.

Le ballon accumulateur de reflux (D108) est muni notamment de :

- Alarme de niveau haut/bas LICAH/L 128;
- LZL129 de niveau bas qui arrête les pompes P105 ;
- PSV110 et PICV 130 qui protègent le D108, contre les éventuelles surpressions internes ;
- Système vide-vite.

Pour la quantification du scenario, les probabilités de défaillance à la sollicitation PFD des éléments physiques du système de réponse à l'urgence sont tirées de la base de données OREDA [OREDA, 2002].

III.4.2. Niveaux d'intervention et maîtrise du scenario

La maitrise du scénario d'incident passe par trois niveaux (voir Fig III.4) :

- **Niveau 1 :** toutes les interventions qui peuvent maitriser la perte de confinement avec les moyens humains et matériels disponibles sur le site où l'urgence s'est déclarée avant le développement de l'événement redouté (déclenchement PII);
- **Niveau 2 :** toutes les interventions qui peuvent maitriser le feu avec les moyens humains et matériels disponibles sur le site après le développement de l'événement redouté et sans avoir recours à l'aide des établissements avoisinants et les autorités publiques (déclenchement PII);
- **Niveau 3 :** toutes les interventions qui ne peuvent pas maitriser l'escalade de l'événement redouté avec les moyens humains et matériels disponibles sur le site sans avoir recours à l'aide des établissements avoisinants et les autorités publiques (déclenchement PII, PAM et ORSEC).

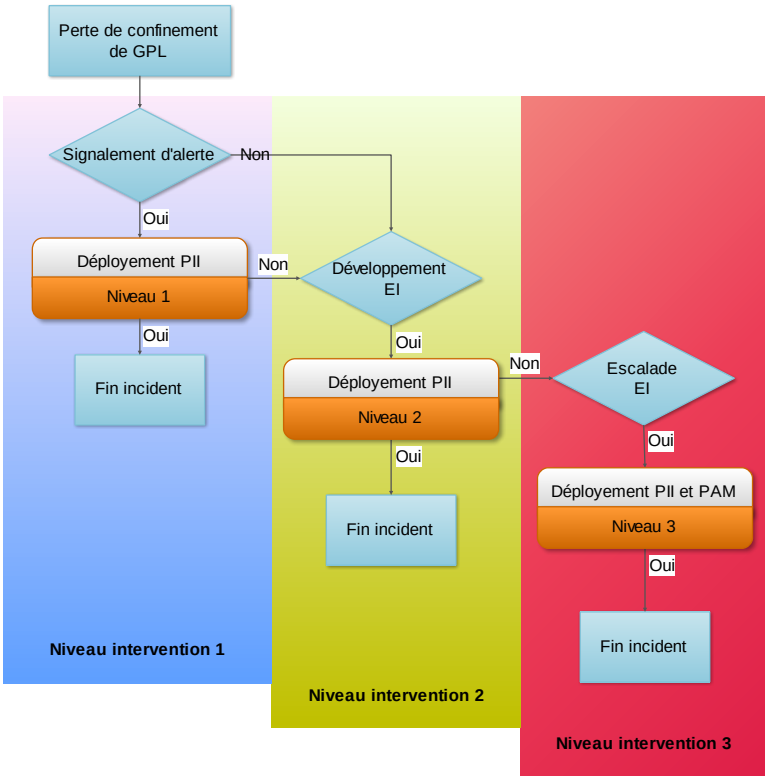


Figure III.4– Niveaux d'intervention - Maîtrise du scénario

III.4.3. Évaluation de la fiabilité du système de réponse à l'urgence SH/DP/HRM

L'objectif de cette étape est la mise en œuvre de l'approche précédemment présentée en s'appuyant sur l'outil MOCA-RP.

III.4.3.1. Couche structurelle

L'ensemble des modules physiques et de synthèse sont présentés dans cette couche.

III.4.3.1.1.Modules physiques

- **Signalement d'alerte :** ce processus est composé des éléments physiques cités dans le tableau suivant :

Tableau III.1– Probabilité de défaillance des éléments physiques de la phase signalement d'alerte avec l'incertitude des paramètres [OREDA, 2002]

Items	PFD/ Probabilité de non-détection	Incertitudes
GD	0.013	unif (0.0004, 0.04)
PLC	0.022	unif (0.01, 0.035)
GA	0.01	unif (0.009, 0.015)
Témoin	0.2	unif (0.1, 0.3)

Les éléments de ce processus sont représentés par les figures ci-dessous : III.5.1, III.5.2, III.5.3, III.5.4.

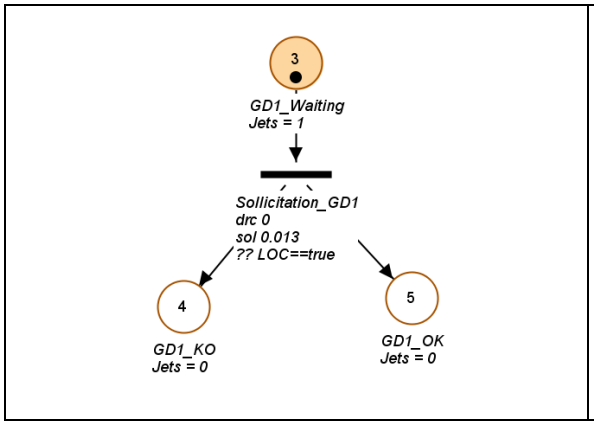


Figure III.5.1– Elément GD

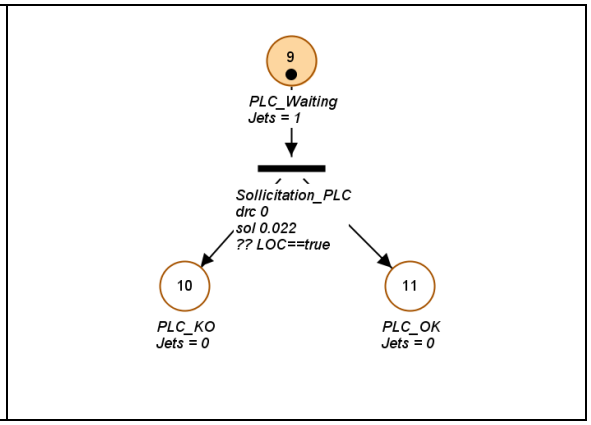


Figure III.5.2– Elément PLC

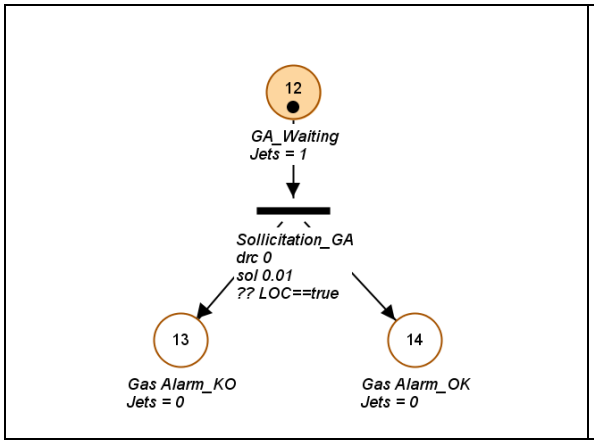


Figure III.5.3– Elément GA

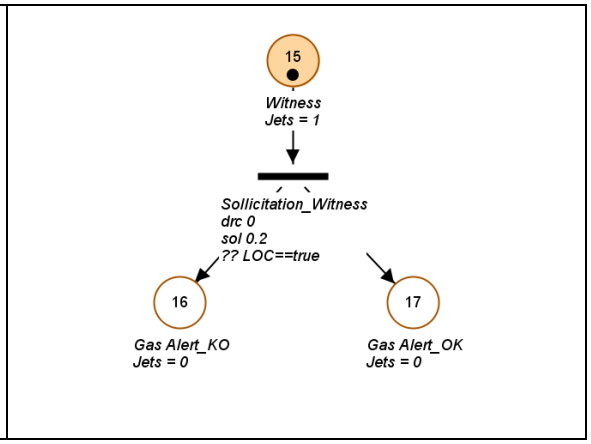


Figure III.5.4– Elément témoin

- **Intervention opérationnelle** : un processus permettant la mise en sécurité de l'installation et l'isolement de l'équipement sinistré.

Tableau III.2– Probabilité de défaillance des éléments physiques de la phase intervention opérationnelle avec l'incertitude des paramètres [OREDA, 2002]

Items	PFD/ Probabilité de non-détection	Incertitudes
Equipe opérationnelle	0.1	unif (0.09, 0.15)
ESD_ PB	0.044	unif (0.03, 0.06)
PIC130	0.003	unif (0.002, 0.0042)
42. P105 A/B	0.044	unif (0.03, 0.06)

Les éléments de ce processus sont représentés par les figures ci-dessous : III.6.1, III.6.2, III.6.3, III.6.4

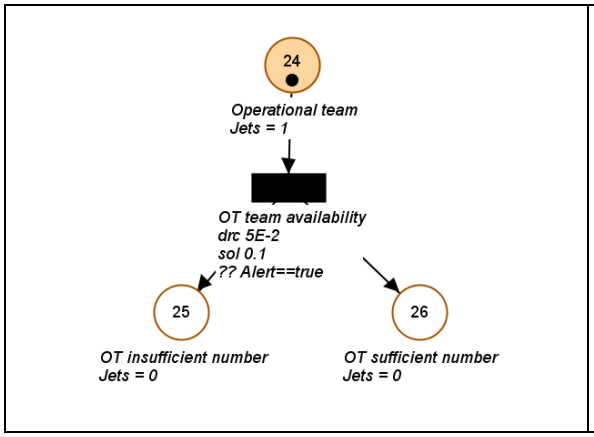


Figure III.6.1− Elément équipe opérationnelle

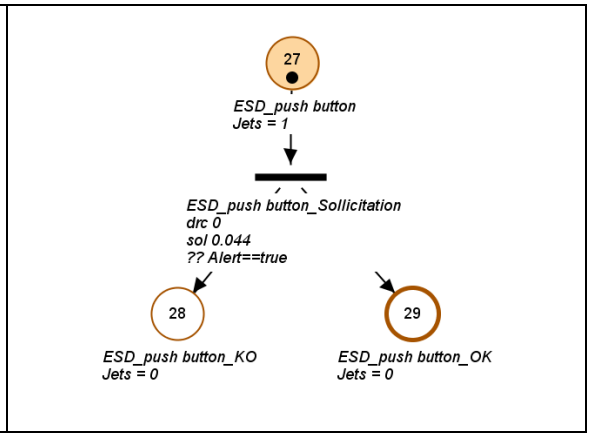


Figure III.6.2− Elément ESD_ PB

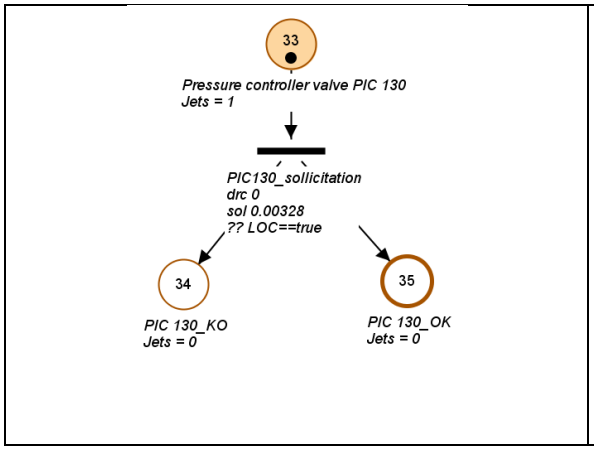


Figure III.6.3− Elément PIC130

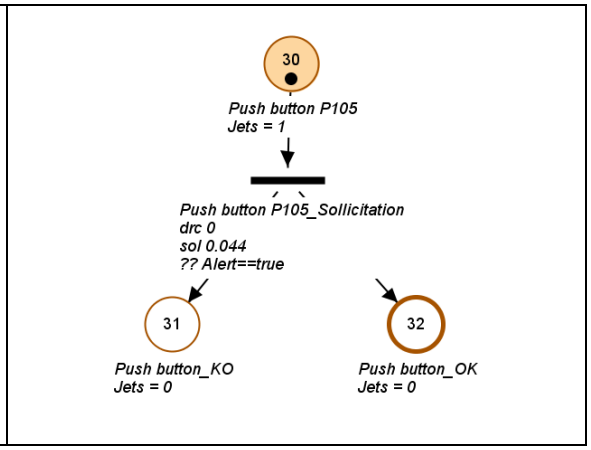


Figure III.6.4− Elément 42. P105 A/B

- **Intervention incendie /secours & sauvetage :** un processus permettant de maîtriser le scénario (prévention des points d'ignition, sauvetage, intervention incendie,…).

Tableau III.3− Probabilité de défaillance des éléments physiques de la phase intervention incendie avec l'incertitude des paramètres [OREDA, 2002]

Items	PFD/ Probabilité de non-détection	Incertitudes
Equipe incendie	0.1	unif (0.09, 0.15)
P113 A/B/C/D & P409A/B	0.019	unif (0.015, 0.025)
Système déluge pompes	0.023	unif (0.02, 0.03)
Réserves d'émulseur	0.09	unif (0.08, 0.01)
Camion intervention VMR	0.01	unif (0.0095, 0.02)

Les éléments de ce processus sont représentés par les figures ci-dessous : III.7.1, III.7.2, III.7.3, III.7.4, III.7.5.

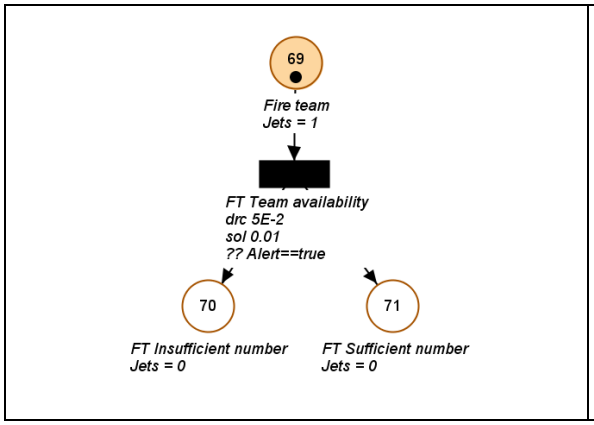


Figure III.7.1– Elément équipe incendie

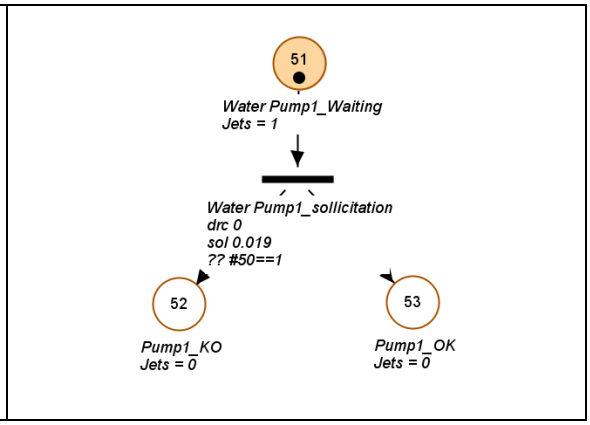


Figure III.7.2– Elément P113 A/B/C/D & P409A/B

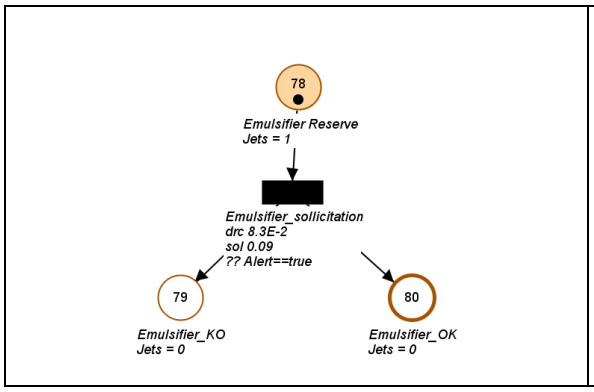


Figure III.7.3– Elément Réserves d'émulseur

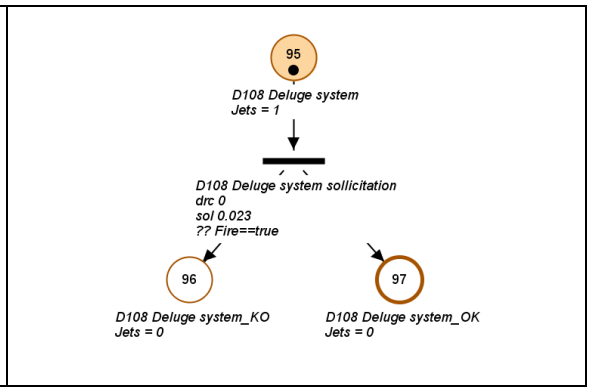


Figure III.7.4– Elément Système déluge D108

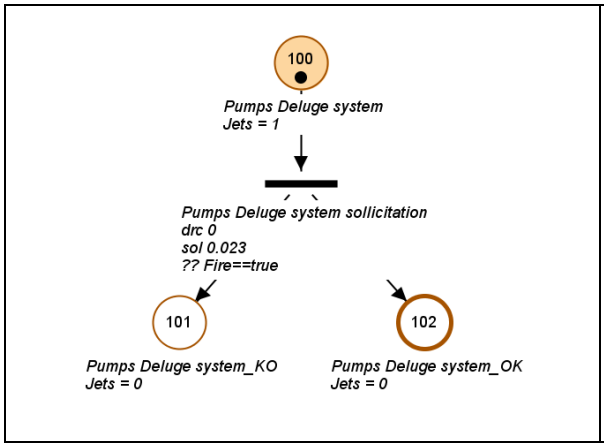


Figure III.7.5– Elément Système déluge pompes

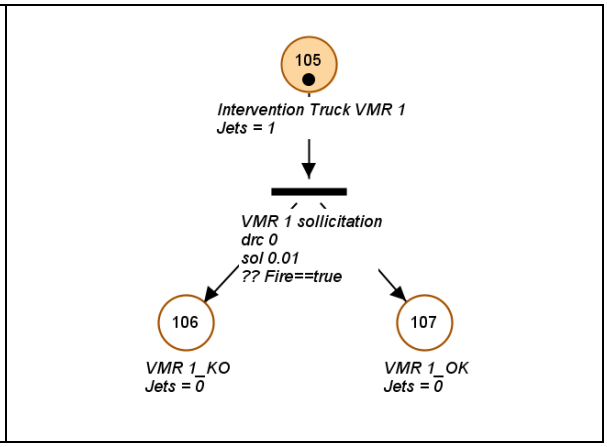


Figure III.7.6– Elément Camion intervention VMR

III.4.3.1.2.Modules de synthèse :

La boucle de détection regroupe trois éléments : détecteur de gaz (GD), unité logique de traitement (PLC) et une alarme gaz (GA).

La figure III.8 représente le module de synthèse de la boucle de détection automatique de fuite de gaz.

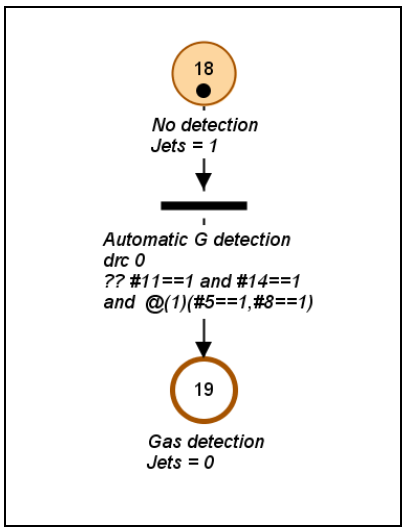


Figure III.8– Module de synthèse. Boucle de détection automatique

III.4.3.2. Couche opérationnelle

Elle comporte les modules activités et les modules contextuels.

III.4.3.2.1.Modules d'activités

- **Signalement d'alerte :** ce processus est assuré soit par une détection automatique (alarme) ou par une détection humaine (alerte).

Cette activité est présentée par la figure ci-après.

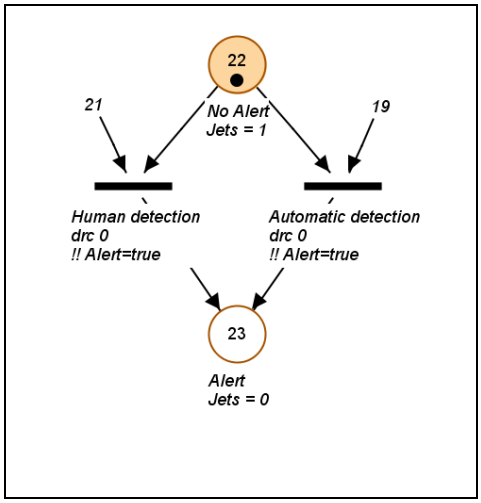


Figure III.9– Activité Signalement d'alerte

- **Intervention opérationnelle :** ces activités se résument dans les taches principales suivantes : mise en sécurité de l'installation (ESD), isolement de l'équipement sinistré (dépressurisation, vide-vite,…)

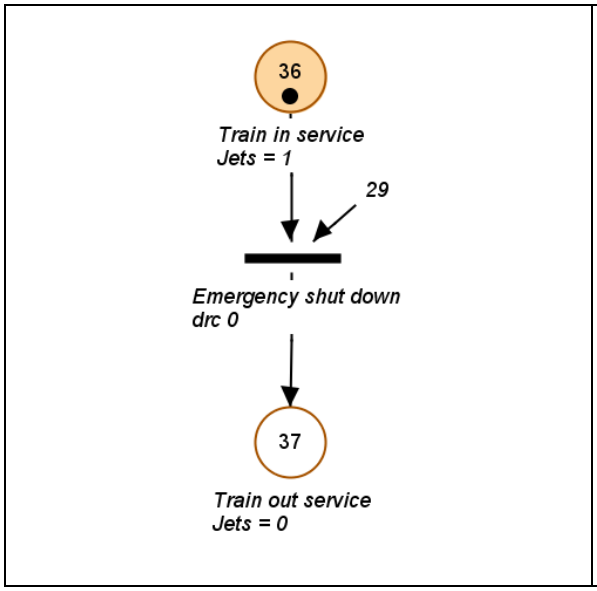


Figure III.10.1− Activité. Mise en sécurité de l'installation (ESD)

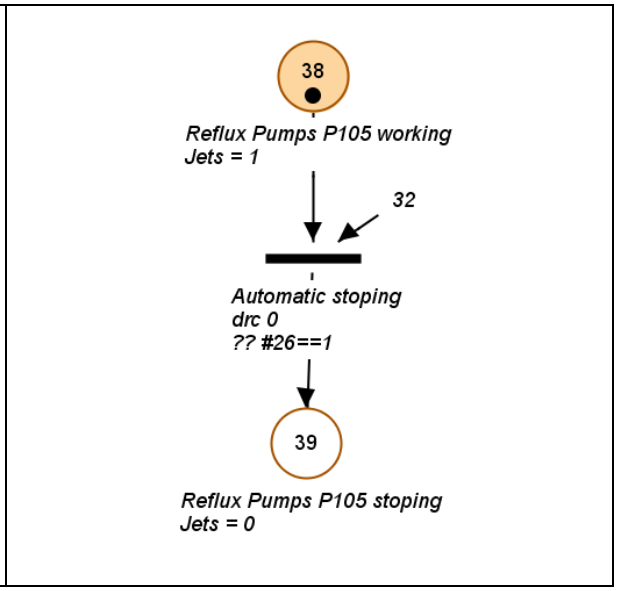


Figure III.10.2− Activité. Arrêt des 42.P105 A/B

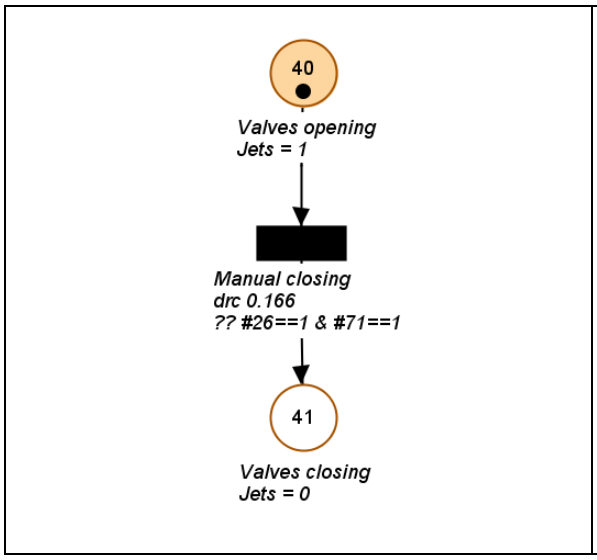


Figure III.10.3− Activité. isolement de l'équipement sinistré

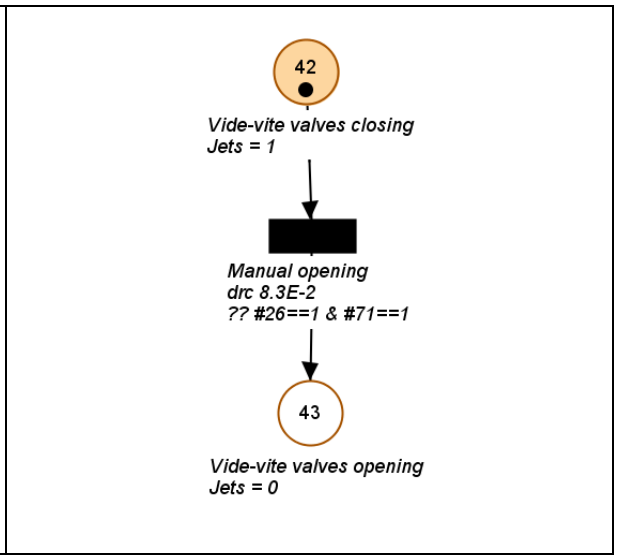


Figure III.10.4− Activité. vide-vite du D108

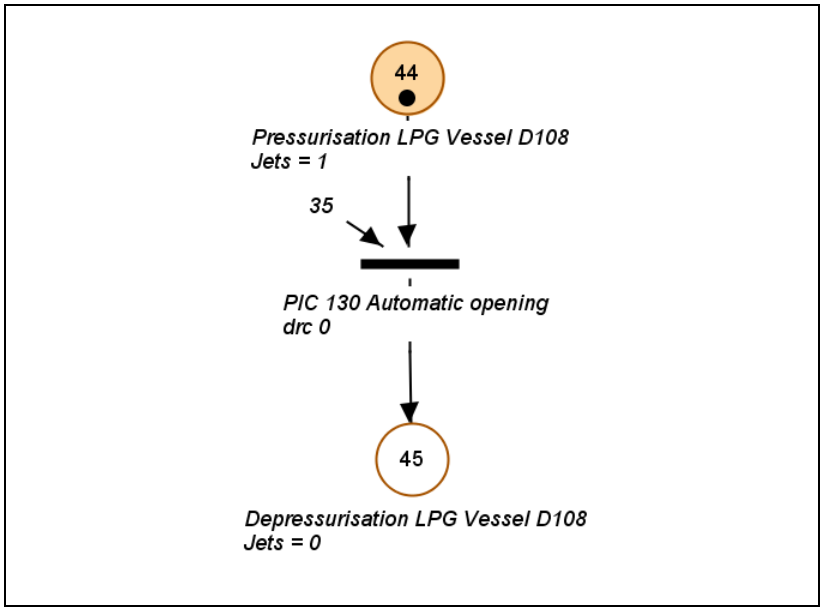


Figure III.10.5− Activité. Dépressurisation Ballon D108

- **Intervention incendie :** Ces activités se résument dans les taches principales suivantes : prévenir les points d'ignition, dilution du nuage gazeux, application de tapis de mousse pour limiter l'évaporation du GPL, en cas de feu en procédant au refroidissement du ballon GPL et les équipements adjacents, …

A préciser que la stratégie d'intervention suit une approche basée sur de modèles empiriques (courbe de montée en puissance CMP/ Courbe de gestion des moyens CGM) caractérisant deux phases d'intervention : temporisation et extinction.

La temporisation est l'attaque à la mousse avec les moyens disponibles sur site en attendant l'arrivée des renforts même avec un taux d'application réduit pendant les premières 15 mn (taux de temporisation = la moitié du taux d'extinction) et la protection des installations menacées par le feu contre les effets dominos.

A noter, le scenario de perte de confinement de GPL du ballon D108 est caractérisé par l'adoption d'une stratégie d'intervention plus spécifique qui se traduit par le refroidissement du ballon par la mousse afin de ne pas casser la mousse appliquée sur la flaque du GPL, en tenant compte les zones d'effets, sécurité des intervenants….

Les activités de cet élément sont présentées par les figures ci-après : III.11.1, III.11.2, III.11.3, III.11.4, III.11.5.

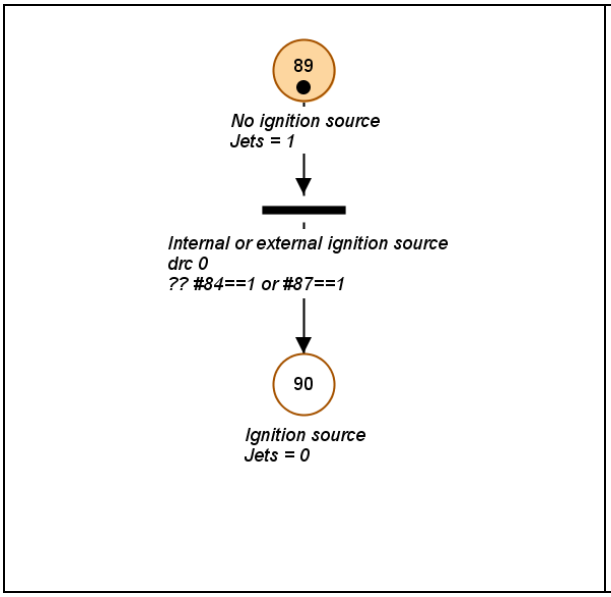


Figure III.11.1– Activité. Prévention sources d'ignition

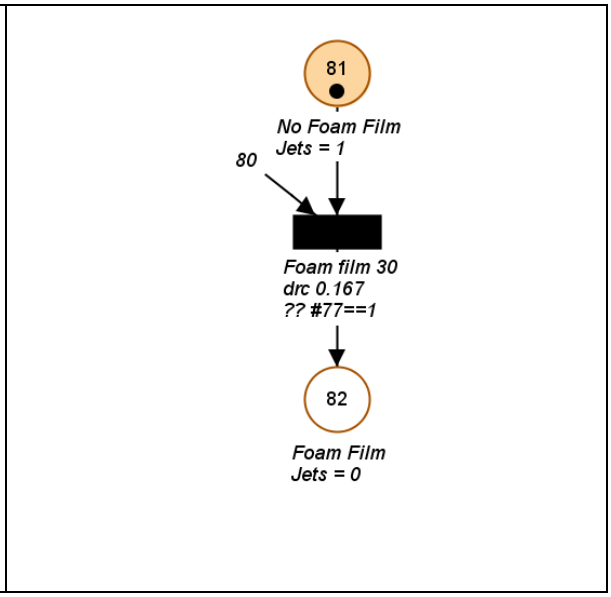


Figure III.12.2– Activité. Application du tapis de mousse

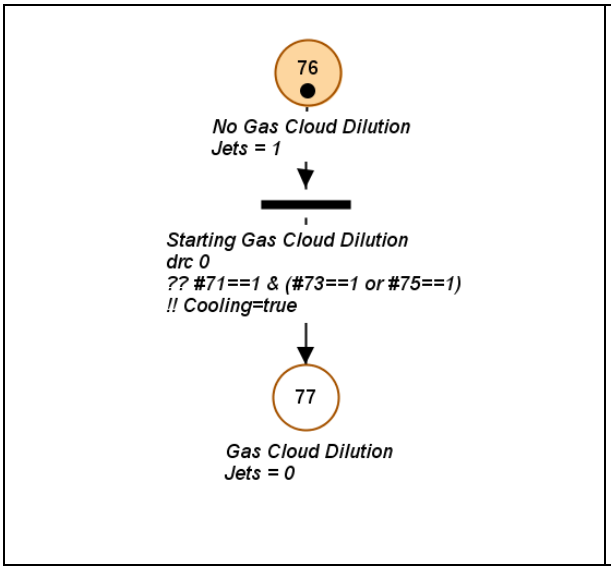


Figure III.11.3– Activité. Dilution du nuage GPL

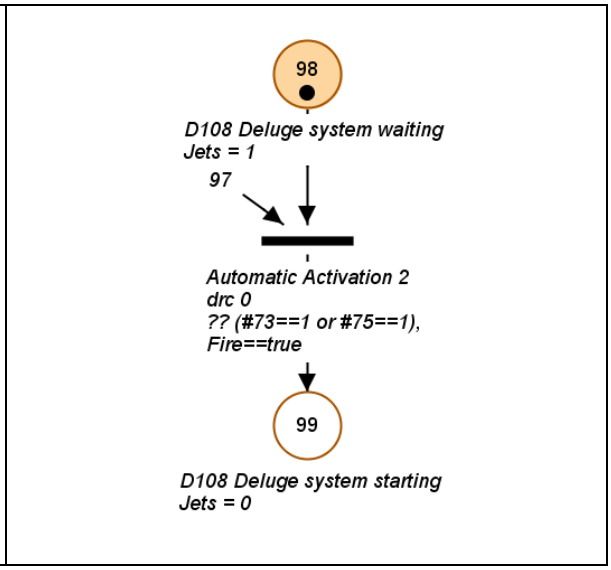


Figure III.11.4– Activité. Refroidissement Ballon D108

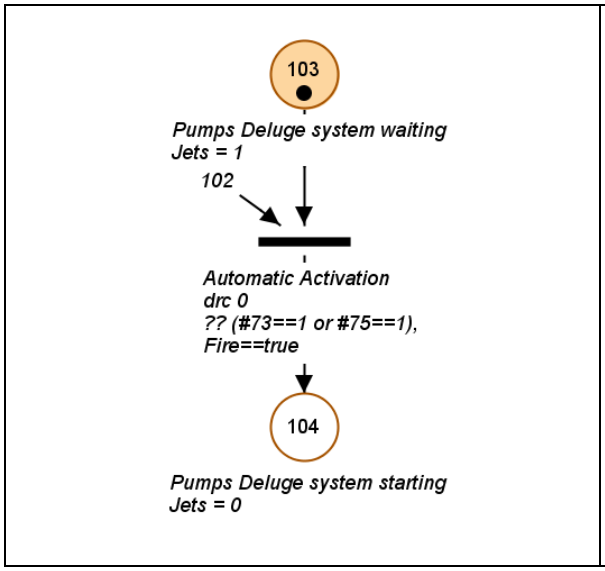


Figure III.11.5– Activité. Refroidissement équipements adjacents

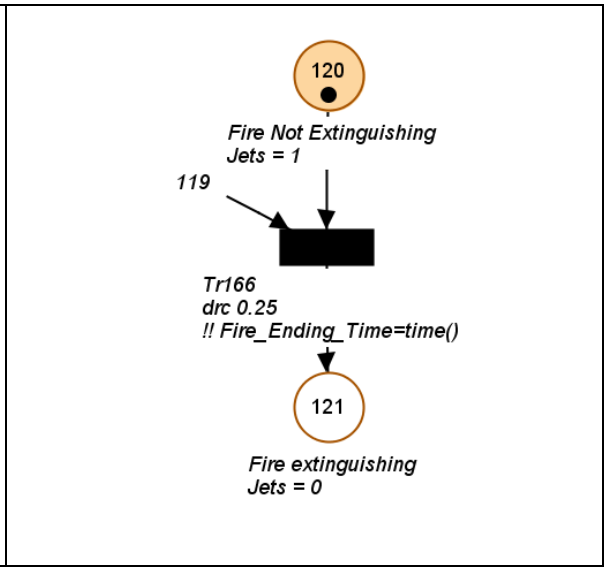


Figure III.11.6– Activité. extinction du feu

III.4.3.2.2.Modules contextuels : ces modules modélisent l'événement redouté et leur développement (Fig. III.12).

- Evénement redouté qui correspond à la perte de confinement (Perte de l'intégrité physique),
- Son développement (incendie),
- Son escalade sous forme d'effets Dominos (Déclenchement des plans de niveaux supérieurs : PAM, ORSEC)

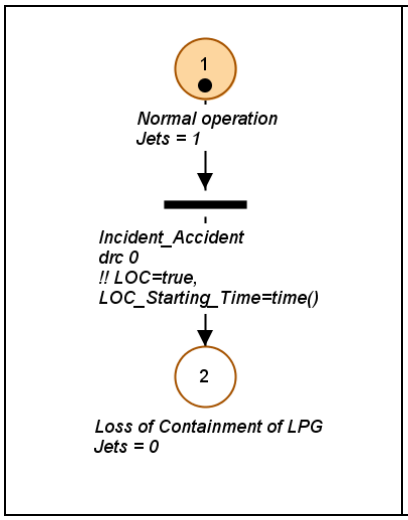


Figure III.12.1– Evénement initiateur (immédiat)

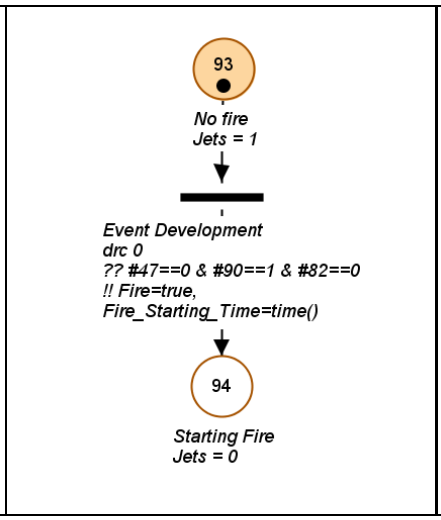


Figure III.12.2– Développement EI

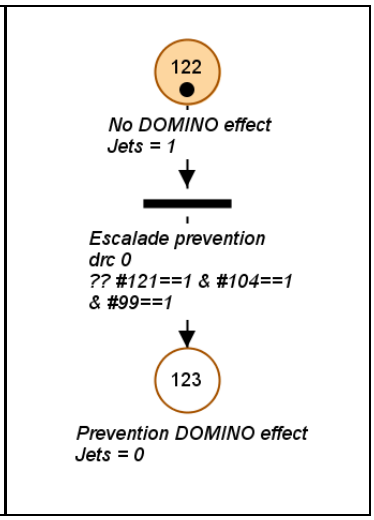


Figure III.12.3– Escalade Potentiel

III.4.3.3. Couche d'évaluation

Les indicateurs de performance du Plan Interne d'Intervention identifiés dans cette couche sont décrits dans le tableau suivant:

Tableau III.4− Indicateurs de performance du plan interne d'intervention

Code indicateur de performance	Caractérisation de l'indicateur de performance du PII
P1	fiabilité du système signalement d'alerte.
P2	fiabilité du système intervention opérationnelle.
P3	fiabilité du système intervention incendie avant le développement de l'événement initiateur.
P4	fiabilité du déploiement avec succès le niveau 1 du PII, il regroupe l'intervention opérationnelle et l'intervention incendie avant le développement de l'EI dans un délai maximum de 15 minutes.
P5	fiabilité du déploiement avec succès le niveau 2 du PII après le développement de l'événement initiateur jusqu'à l'extinction de l'incendie dans un délai maximum de 30 minutes. Ce délai peut être porté à 60 minutes pour d'autres cas (escalades).
P6	Fiabilité du système de la prévention de l'escalade (effets dominos).
P7	fiabilité globale du système de réponse à l'urgence PII.

La simulation du Monte-Carlo avec un nombre d'histoire égale 1E-7 des réseaux de Petri développés, a données les résultats suivants:

Tableau III.5 : Résultat de la simulation avec incertitude aléatoire et sans incertitude des paramètres

Nom	Valeur	Ecart-type	IC borne Inf.	IC borne Sup.
P1	9.9359E-1	7.9788E-2	9.9355E-1	9.9363E-1
P2	8.0631E-1	3.9518E-1	8.0610E-1	8.0651E-1
P3	7.0099E-1	4.5782E-1	7.0076E-1	7.0123E-1
P4	5.7460E-1	4.9440E-1	5.7434E-1	5.7485E-1
P5	9.8999E-1	9.9525E-2	9.8994E-1	9.9004E-1
P6	8.8874E-1	3.1444E-1	8.8858E-1	8.8890E-1
P7	5.4299E-1	4.9814E-1	5.4273E-1	5.4325E-1

III.5. Discussion des résultats

Le tableau III.5 présente les indicateurs de performance du Plan Interne d'Intervention PII obtenus après la simulation des RdPs développés.

A titre indicatif, les indicateurs de performance P1, P5 et P6, ont des valeurs très élevées (niveau de fiabilité élevé), le fait de la combinaison des deux barrières techniques et humaines, en l'occurrence le système de détection automatique de la fuite du GPL et l'arrivée des renforts (Camions intervention VMR) pour l'extinction du feu après le développement de l'événement initiateur.

Les indicateurs de performance P2 et P3, ont des valeurs moins élevées, le fait que cette phase est principalement confiée aux barrières humaines (intervention humaine) : l'isolement en amont/aval de l'équipement, vide-vite du ballon D108 par des vannes manuelles, éventuellement l'évaluation quantitative de la quantité d'émulseur nécessaire disponible sur lieu de l'incident et la fiabilité des pompes d'eau incendie.

L'indicateur de performance P4, a une valeur aussi basse que les précédents (phase de temporisation).

A préciser, 42.54% des cas la maitrise de perte de confinement du GPL dépasse 15 min. Ce constat concerne principalement les indicateurs P2 et P3.

A souligner, que les incertitudes liés aux durées de réalisation des actions d'urgence et les probabilités de défaillance à la sollicitation pour les éléments du système de réponse à l'urgence sont des facteurs importants à prendre en compte pour le calcul des indicateurs, dont ces incertitudes vont certainement influencer significativement les résultats (sous ou sur estimation de la fiabilité du système de réponse à l'urgence). Dans notre étude, on a essayée d'être plus objectif dans l'attribution des valeurs PFD et durée de réalisation des actions, en se basant sur l'expertise des industriels et le jugement d'expert pour obtenir des valeurs plus fiables.

Une deuxième série de résultats liée à la simulation des RdPs développés en tenant compte l'incertitude des paramètres est présentée dans le tableau III.6.

Tableau III.6– Résultats obtenus avec l'incertitude aléatoire et l'incertitude des paramètres (Nombre d'histoires 10E-5)

Nom	Valeur	Ecart-type	IC borne Inf.	IC borne Sup.
P'1	9.930 E-1	2.5492 E-3	9.929 E-1	9.932 E-1
P'2	6.990 E-1	2.2277 E-2	6.979 E-1	7.002 E-1
P'3	6.696 E-1	2.7845 E-2	6.682 E-1	6.710 E-1
P'4	4.366 E-1	2.0200 E-1	4.262 E-1	4.471 E-1
P'5	9.900 E-1	2.9314 E-3	9.899 E-1	9.902 E-1
P'6	7.854 E-1	1.7559 E-2	7.845 E-1	7.863 E-1
P'7	4.109 E-1	1.9010 E-1	4.011 E-1	4.208 E-1

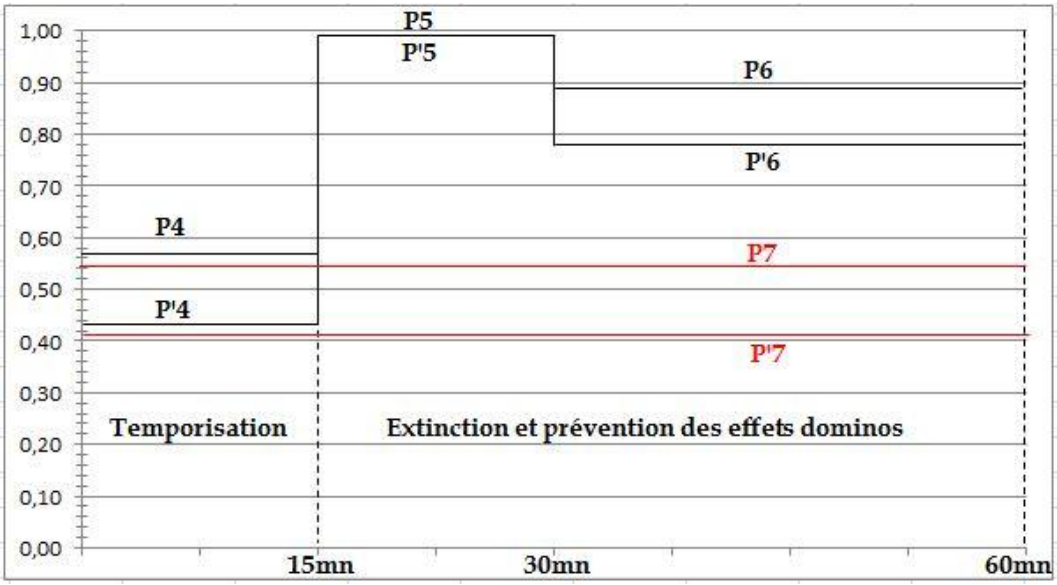


Fig III.13: Courbes de fiabilité du PII sans et avec incertitude des paramètres

Les résultats du tableau III.6 illustre parfaitement que lorsque les incertitudes des paramètres sont prises en compte, les indicateurs précédents sont démunis. Cette diminution est mineure pour P1, P3 et P5, elle est importante pour P2, P4 et P6. Ce tableau démontre également la propagation (distribution aléatoire) des incertitudes qui a influencé nos résultats d'étude (indicateurs) et par conséquent la fiabilité de notre système de réponse à l'urgence, dont la prise en compte de l'incertitude dans la mesure de performance du système en question est indispensable.

La figure III.13 présente deux phases d'intervention (temporisation et extinction) et leurs fiabilités.

A noter, l'indicateur de performance P6 a une valeur de fiabilité inférieure à celle du P5 dans la même phase d'intervention à cause du non déclenchement du plan d'aide mutuelle PAM (plan de niveau supérieur) (fig. III.13).

Par conséquent, l'amélioration de performance du PII passe nécessairement par :

- l'automatisation des dispositifs d'isolement et de vidange du ballon GPL par (Fig III.14) :

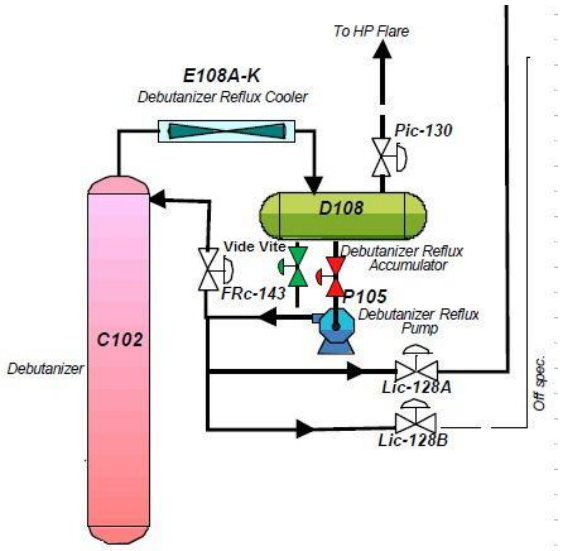


Fig III.14 : Nœud reflux débutaniseur après modification

- Installation des vannes d'isolement de commandes à distance sur la ligne 12'' reliant le ballon GPL et les pompes P105 A/B ;
- Installation des vannes vide-vite de commande à distance des ballons GPL D108
- Fiabilisation des pompes anti incendie (test annuel de performance, essais hebdomadaires, entretien préventif).
- Etude préalable des besoins en émulseur et eau (établissement de la courbe de montée en puissance CMP).

Une troisième série de résultats liée à la simulation des RdPs développés en tenant compte les améliorations proposées au niveau du système de protection du ballon D108 et en considérant l'incertitude aléatoire et l'incertitude des paramètres sont présentée dans le tableau III.7.

Tableau III.7: Résultat de la simulation Monte-Carlo avec incertitude aléatoire et incertitude des paramètres après les améliorations proposées (nombre d'histoires égale 1E-5)

Nom	Valeur	Ecart-type	IC borne Inf.	IC borne Sup.
P''1	9.930 E-1	2.5501 E-3	9.9220 E-1	9.9320 E-1
P''2	9.692 E-1	3.3114 E-3	9.6900 E-1	9.6940 E-1
P''3	9.564 E-1	4.4605 E-3	9.5610 E-1	9.5660 E-1
P''4	9.334 E-1	4.8628 E-3	9.3320 E-1	9.3370 E-1
P''5	9.990 E-1	3.1586 E-4	9.9900 E-1	9.9900 E-1
P''6	9.708 E-1	3.1458 E-3	9.7070 E-1	9.7100 E-1
P''7	9.278 E-1	4.8646 E-3	9.2760 E-1	9.2810 E-1

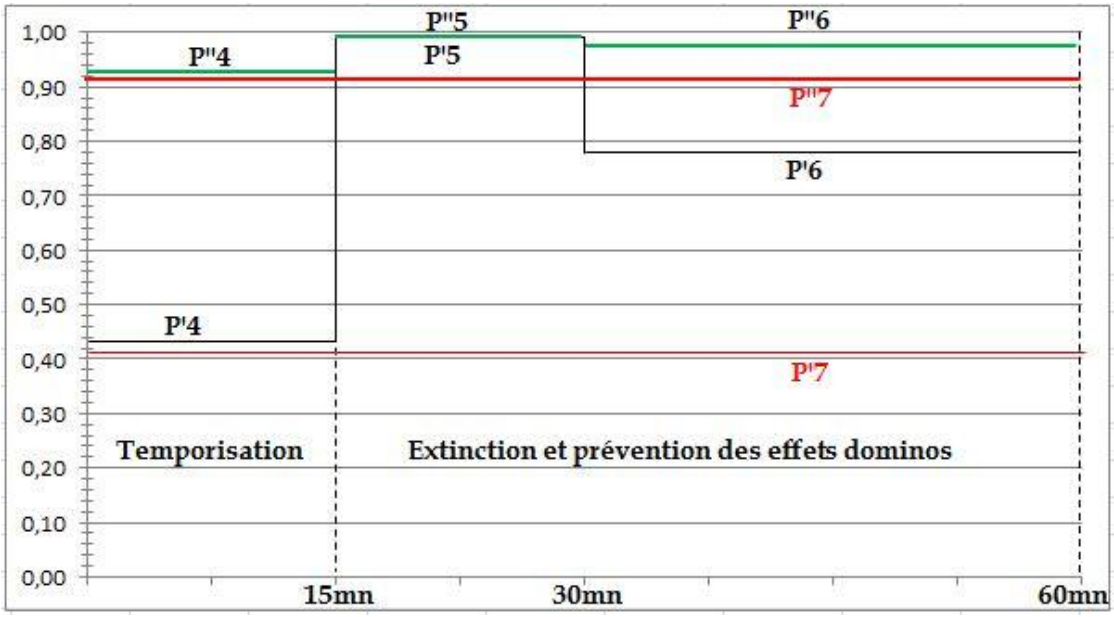


Fig. III.15 : Courbe de fiabilité du PII après les améliorations proposées

Les indicateurs de performance P''1, P''2, P''3, P''4, P''5, P''6 et P''7 ont des valeurs très élevées après la modification proposée du système par l'installation des vannes de commande à distance.

Le système de réponse à l'urgence PII SH/DP/HRM a un niveau de fiabilité très élevée (indicateur de performance P''7) après les améliorations proposées, le fait de la combinaison des deux barrières techniques et humaines dans les deux phases de l'intervention (temporisation et extinction) (fig. III.15).

III.6. Conclusion

Dans ce chapitre, une nouvelle approche d'évaluation de la performance du système de réponse à l'urgence à l'aide des réseaux de Petri a été présentée. Un événement redoute ER, le plus représentatif sur le procédé de traitement de gaz SH/DP/HRM « perte de confinement du ballon GPL – Ballon D108 » a été retenu.

Pour la mesure et l'évaluation de la performance du système de réponse à l'urgence, des indicateurs de performance jugés les plus pertinents ont été également identifiés, présentés par sept catégories (valeurs probabilité). En outre, trois types de quantification ont été réalisés en s'appuyant sur la simulation de Monte Carlo. La première considère l'incertitude aléatoire, tandis que la seconde prend à la fois les incertitudes aléatoires et les incertitudes des paramètres, dont cette dernière a donné des résultats plus réalistes et plus crédibles, permettant une évaluation objective de la performance du système de réponse à l'urgence étudié. La troisième prend en compte des modifications proposées au système de protection du ballon D108 en considérant les deux types d'incertitudes aléatoires et paramétriques.

Conclusion Générale

Arrivés au terme de ce travail, force est de constater que nombre d'idées et de voies de recherche s'ouvrent à nous, concernent notamment le développement des outils et des démarches d'évaluation de la performance des plans de réponse à l'urgence et de gestion des crises.

Les Plans Internes d'Intervention jouent un rôle majeur dans la limitation des conséquences des accidents industriels majeurs. Par conséquent, une attention particulière devrait être accordée au cours de leur développement et leur mise en œuvre.

Rappelons tout d'abord, l'objectif de ce mémoire, dont l'intitule « **Évaluation de la performance des plans internes d'intervention via les réseaux de Petri** », est de contribuer au développement des outils permettant d'analyser le comportement dynamique des plans d'urgences, d'évaluer et d'améliorer leurs performance et définir les grands axes d'amélioration pour une meilleure efficacité des PII, dont une nouvelle approche d'évaluation de la performance des PII a été proposée, au moyen des réseaux de Petri.

Un enchainement logique dans le traitement du sujet, nous amène de revenir sur des points représentant les résultats obtenus de chaque chapitre:

Le premier chapitre a permet de poser la problématique de la gestion des risque HSE dans le secteur pétrolier et l'importance des plans d'urgence comme barrières de protection en vue de limiter et confiner les conséquences en cas de survenance d'un d'accidents industriel. A travers une étude de l'état des PII, il a été démontré que les approches actuelles tendant à évaluer leur performance sont des approches qualitatives, dans ce travail, on a utilisé une méthode quantitative pour l'analyse fonctionnelle (étude de fiabilité) des PII, suivant une approche probabiliste, comme indicateur clé d'évaluation de leur performance. Pour cela, les réseaux de Petri sont retenus comme outil puissant et plus adapté pour l'évaluation quantitative de la performance des PII, basée sur la fiabilité de ses composants.

Ensuite, le deuxième chapitre a été consacré à une présentation succincte des réseaux de Petri et la simulation de Monte-Carlo, puis présentant une démarchée structurée, proposée dans le cadre du présent mémoire, en couplant les deux outils RdP et MOCA comme outils de modélisation du comportement dynamique des systèmes complexes et d'évaluation de leurs performance, dont la complexité du système étudié (PII), a imposé la structuration des modèles. Pour cela, une approche a été adoptée permettant la modélisation des systèmes complexes au moyen des réseaux de Petri, et par la suite, on a identifié les sources d'incertitude, analysé et étudié leur propagation par l'outil de simulation MOCA.

Le troisième chapitre présente une étude de cas et une mise en application succincte de la méthodologie proposée pour l'évaluation de la performance du système de réponse à l'urgence PII de Sonatrach DP Hassi R'Mel pour un scénario représentatif (enveloppe) au moyen du MOCA-RP.

Le troisième chapitre était consacré à l'étude exploratoire des documents réglementaires Etude de danger (EDD) et le Plan Interne d'Intervention (PII) de la Sonatrach DP Hassi R'Mel, permettant de retenir le scénario le plus représentatif (dit enveloppe) : Perte de confinement de GPL- Ballon 42-D108, dont le scenario étudié présente un modèle séquentiel d'incident (perte de confinement, dispersion de nuage, inflammation,…etc.). Ensuite, nous avons discuté les différents niveaux d'intervention, les mesures de maîtrise du scenario et l'évaluation de la fiabilité des composants du système PII en utilisant l'outil MOCA-RP, dont les résultats sont présentés sous forme de courbes de fiabilité pour chaque indicateur retenu.

A souligner, que les incertitudes liés aux durées de réalisation des actions d'urgence et les probabilités de défaillance à la sollicitation pour les éléments constituants du système PII sont des facteurs importants à prendre en compte pour le calcul des indicateurs, dont ces incertitudes vont certainement influencer significativement les résultats (sous ou sur estimation de la fiabilité du système de réponse à l'urgence).

En raison de l'imprécision des données, les indicateurs de performance du PII sont calculés avec ou sans prise en compte de l'incertitude des paramètres (durées de réalisation des actions d'urgence, PFD des éléments constituants du système PII), en comparant les deux résultats. Une analyse de ces indicateurs a permit de tirer des recommandations d'amélioration de la performance du PII.

La prise en compte des recommandations issues de cette étude sur le système de reflux du ballon GPL D108 a permis de démontré par le calcul, l'efficacité de l'approche proposée (outil des réseaux de Petri) dans l'amélioration du niveau de sécurité du ballon GPL, et par la suite, le niveau de performance du PII, selon une démarche quantitative prouvée.

A préciser également dans ce travail, on s'est basé sur la fiabilité de l'aspect technique (automatisation des systèmes de protection du ballon GPL) et son importance dans l'amélioration de la performance et l'efficacité du système de réponse à l'urgence par priorité à la source.

- **Perspectives**

Le travail réalisé dans ce mémoire est un premier pas dans l'évaluation de la performance des systèmes de réponse à l'urgence au moyen des réseaux de Petri, dont d'autres approches, pour évaluer la performance des plans de réponse à l'urgence quantitativement dans un milieu incertain peuvent être développées et peuvent également faire l'objet de futures études.

Bibliographie

1. [Alexander, 2002] Alexander, D., 2002. Principles of emergency planning and management. Terra Publishing, ISBN: 1-903544-10-6.
2. [Alexander, 2005] Alexander, D., 2005. Towards the development of a standard in emergency planning. Disaster Prevention and Management, 14(2), 158-175.
3. [Aven et Zio, 2011] Aven, T., Zio, E., 2011. Some considerations on the treatment of uncertainties in risk assessment for practical decision-making, Reliability Engineering and System Safety, vol. 96, pp. 64-74.
4. [Blume et al., 2007] Blume, H., Von, S.T., Becker D. & Noll T.G., 2007. Application of deterministic and stochastic Petri Nets for performance modeling of NoC architectures, Journal of Systems Architecture, 53, 466-476.
5. [Buratti et al., 2012] Buratti, N., Ferracuti, B., Savoia, M., Antonioni, G., and Cozzani , V.,2012. A fuzzy-sets based approach for modelling uncertainties in quantitative risk assessment of industrial plants under seismic actions,Chemical Engineering Transactions, vol. 26, pp. 105-110.
6. [Cabarbaye et Laulheret, 2005] Cabarbaye, A., Laulheret, R., 2005. Evaluation de la sûreté de fonctionnement des systèmes dynamiques par modélisation récursive. 6ème Congrès International pluridisciplinaire, qualité et sûreté de fonctionnement, Bordeaux.
7. [Cédrick, 2011] Cédrick, M., 2011, La gestion des risques d'accidents industriels majeurs : état de la situation sur le territoire de la Pointe-De-L'île. CSSS de la Pointe-de-l'Île.
8. [Chabot, 1998] Chabot, J.L., 1998. Approche probabiliste relative à l'étude des scénarios d'incendie. Université de Poitiers-ENSMA.
9. [Chorier, 2007] Chorier, J., 2007. Diagnostic et évaluation des risques incendies d'une construction et de sa mise en sécurité, Thèse de doctorat, Université de Savoie.
10. [CRAIM, 2007] Conseil pour la Réduction des Accidents Industriels Majeurs, 2007. Guide de gestion des risques d'accidents industriels majeurs. Canada.
11. [DC HSE, 2007] Direction centrale Hygiène Sécurité Environnement, 2007. Référentiel du système de gestion des urgences et des crises (ICS), SONATRACH.

12. [DCSSE, 2007] Direction Centrale Sante, Sécurité & Environnement, 2007. Référentiel Système de Gestion des Urgences et des Crises, Standard Plan d'Organisation Interne POI. SONATRACH.
13. [DDSC, 1985] Direction de la Défense et de la Sécurité Civiles, 1985. Guide d'élaboration d'un Plan d'Opération Interne, ISBN : 2-905015-16-0
14. [DDSC, 2006] Direction de la Défense et de la Sécurité Civiles, 2006. Guide ORSEC Départemental – Méthode générale, Tome G.1, http://www.interieur.gouv.fr/sections/a_l_interieur/defense_et_securite_civiles/dossiers/plan-orsec
15. [DDSC, 2007] Direction de la Défense et de la Sécurité Civiles, 2007. ORSEC Départemental – Disposition Spécifique – Plan Particulier d'Intervention (PPI) – Etablissements SEVESO « seuil haut », Mémento, Tome S.1.1., http://www.interieur.gouv.fr/sections/a_l_interieur/defense_et_securite_civiles/gestion-risques/planification-orsec
16. [Dewil, 2010] Dewil, I.P., 2010. La planification d'urgence : Où en sommes-nous ? Où allons-nous ? Séminaire –6 mai 2010 : Approche structurée ou situation d'urgence ? Les Isnes.
17. [Dhouibi, 2005] Dhouibi H., 2005. Utilisation des réseaux de Petri a intervalles pour la régulation d'une qualité: application a une manufacture de tabac, Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille et par l'Ecole Centrale de Lille.
18. [DNV, 2010] DET NORSKE VERITAS, 2010. Etude De Danger (EDD), Rapport N° EP002718 N°6-8 . SONATRACH DP HRM Centre.
19. [DNV, 2011] DET NORSKE VERITAS, 2011. Plan d'Intervention Interne (PII), Rapport N° EP002720 N° 6 – HRM Centre, SONATRACH.
20. [Dubi, 2000] Dubi, A., 2000. Monte Carlo Applications in systems engineering. John Wiley & Sons, Ltd. England.
21. [Durga et al., 2007] Durg,a R.K., Kushwaha, H., Verma, A., and Srividya, A., 2007. Quantification of epistemic and aleatory uncertainties in level-1 probabilistic safety assessment studies. Reliability Engineering and System Safety 92, 947–956.
22. [EMA, 2004] Emergency Management Australia, 2004. Emergency Planning, ISBN: 0-9750474-5-0
23. [EPA, 2009] Environmental Protection Agency, 2009. Guidance on the development, Evaluation, and application of Environmental models. U.S.

24. [FEMA, 1996] Federal Emergency Management Agency, 1996. Guide for All-Hazard Emergency Operations Planning, State and Local Guide (SLG) 101, http://www.fema.gov
25. [FEMA, 2003] Federal Emergency Management Agency, 2003. Guidelines for HazMat/WMD response, Planning and Prevention Training, http://www.usfa.dhs.gov/fireservice/subjects/hazmat//hmep.shtm
26. [FEMA, 2009] Federal Emergency Management Agency, 2009. Developing and maintaining state, territorial, tribal and local government emergency plans, http://www.fema.gov/about/divisions/cpg.shtm
27. [GESIP, 2000] Groupe d'Etudes de Sécurité des Industries Pétrolières et Chimiques, 2000. Guide méthodologique du GESIP pour l'élaboration d'une courbe de montée en puissance – Rapport n° 96/03.
28. [GESIP, 2001] Groupe d'Etudes de Sécurité des Industries Pétrolières et Chimiques, 2001. Guide méthodologique du GESIP pour l'élaboration du P.O.I. d'un site industriel, usine chimique, complexe pétrochimique – Rapport GESIP 96/01
29. [Gu et Bahri, 2002] Gu, T., Bahri, P.A., 2002. A survey of Petri net applications in batch processes, Computers in Industry, 47, 99-111.
30. [Hamzi et al, 2013] Hamzi, R., Innal, F., Boudaa, A., Chati, M., 2013. Performance assessment of an emergency plan using Petri nets, Chemical Engineering Transactions, 32, 235-240 DOI: 10.3303/CET1332040.
31. [Hoeting, 1999] Hoeting, J., Madigan, A., and Volinsky, T., 1999. Bayesian model averaging : A tutorial. Statistical science 14, 382–417.
32. [Huang et Liang, 2004] Huang, C., Liang, W.Y., 2004. Object-oriented development of the embedded system based on Petri nets. Computer Standards & Interfaces, 26, 187-203.
33. [IEC 61508, 2010] International Electrotechnical Commission, 2010. Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety related systems, IEC 61508, 2nd ed, Geneva, Switzerland.
34. [IFRC, 2007] International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies, 2007. Disaster response and contingency planning guide.
35. [Innal et al., 2014] Innal, F., Hamzi, R., Djeddi, C., 2014. Handling uncertainty in emergency plan evaluation using generalized Peti Nets, The 1st International Conference on ICTs for Disaster Management ICT-DM'2014, DOI: 10.1109/ICT-DM.2014.6917783

36. [Jackson, 2008] Jackson, B., 2008. The Problem of Measuring Emergency Preparedness – The Need for Assessing "Response Reliability" as Part of Homeland Security Planning, Rand Corporation, http://www.rand.org .
37. [JORADP, 2009] Journal Officiel de La République Algérienne Démocratique et Populaire, Décret exécutif n° 09-335 du 20 octobre 2009.fixant les modalités d'élaboration et de mise en œuvre des plans internes d'intervention par les exploitants des installations industrielles.
38. [Kaddoussi, 2012] Kaddoussi, A., 2012. Optimisation des flux logistiques: vers une gestion avancée de la situation de crise. Thèse de doctorat, Ecole Centrale De Lille.
39. [Kanno et Furuta, 2006] Kanno, T., Furuta, K., 2006. Resilience of Emergency Response Systems. 2nd Symposium on Resilience Engineering: November 8-10, 2006,Juan-les-Pins,France,http://www.resilience-engineering.org/proceedings.html
40. [Karagiannis, 2010] Karagiannis, G. M., 2010. Méthodologie pour l'analyse de la robustesse des plans de secours industriels. Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne.
41. [Karagiannis et al., 2010] Karagiannis, G.M., Piatyszek, E., Flaus, J.M., 2010. Industrial emergency planning modeling: A first step towards a Robustness Analysis Tool. Journal of Hazardous Materials, 18, 324-334.
42. [Kent, 1994] Kent, 1994. Disaster preparedness, 2nd edition, United Nations Disaster Management Training Program.
43. [Labeau et al., 2000] Labeau P.E., Smidts C., Swaminathan S., 2000. Dynamique reliability: towards an integrated platform for probabilistic risk assessment. Reliability Engeneering and System safety, Elsevier. 68, p.219-254.
44. [Lachtar, 2012] Lachtar, D., 2012. Contribution des systèmes multi-agent à l'analyse de la performance organisationnelle d'une cellule de crise communale. Thèse de doctorat, École nationale supérieure des mines de Paris.
45. [Lagadec, 2000] Lagadec, P., 2000. Ruptures créatrices. Collection tendances, Editions d'organisation, 119p.
46. [Lagadec, 2007] Lagadec, P., 2007. Katrina : Examen des rapports d'enquête, Tomes 1 et 2, Ecole Polytechnique – Centre National de la Recherche Scientifique, http://ceco.polytechnique.fr
47. [Larken et al., 2001] Larken, J., Shannon, H., Strutt, J.E., Jones, B., 2001. Performance indicators for the assessment of emergency preparedness in major accident hazards, U.K. Health and Safety Institute, ISBN: 0-7176-2038-7.

48. [Laronde, 2011] Laronde, R., 2011. Fiabilité et durabilité d'un système complexe dédié aux énergies renouvelables Application à un système photovoltaïque, thèse de doctorat, Université d'Angers.
49. [LeDuy, 2011] LeDuy, T.D., 2011. Traitement des incertitudes dans les applications des Études Probabilistes de Sûreté Nucléaire, Thèse de doctorat, Université de Technologie de Troyes.
50. [Marseguerra et al., 1998] Marseguerra M., Zio E., Devooght J., Labeau P.E., 1998. A concept paper on Dynamic Reliability via Monte Carlo Simulation. Mathematics and Computers in Simlation 47, p.371-382.
51. [Mayer, 2005] Mayer, H., 2005. First Responder Readiness: A systems approach to readiness assessment using model based vulnerability analysis techniques. Master's thesis. U.S. Naval Postgraduate School.
52. [McEntire, 2005] McEntire, D.A., 2005. Disaster Response Operations and Management – Instructor's Guide, Federal Emergency Management Agency.
53. [Mihalache, 2007] Mihalache, A., 2007. Modélisation et évaluation de la fiabilité des systèmes mécatroniques : application sur système embarqué. Thèse de doctorat, Université d'Angers.
54. [MIPMEPI, MICL, 2010] Ministère de l'Industrie, de la Petite et Moyenne Entreprise et de la Promotion de l'Investissement. Ministère de l'Intérieur et des Collectivités Locales, 2010. Canevas Plan Interne d'Intervention, Algérie.
55. [Muller, 2010] Muller A., 2010. Développement d'une méthode de modélisation pour l'évaluation de la performance de stratégies de sécurité incendie, Thèse de doctorat, Université de Haute Alsace.
56. [Niel et Craye, 2002] Niel, E., Cray, E., 2002. Maîtrise des risques et sûreté de fonctionnement des systèmes de production. Productique: information, commande, communication, Lavoisier.
57. [OCDE, 1992] Organisation pour la Coopération et le Développement Économique, 1992. ACCIDENTS CHIMIQUES Principes directeurs pour la prévention, la préparation et l'intervention, Orientation à l'intention des pouvoirs publics, de l'industries, des travailleurs et d'autres parties intéressées, OCDE/GD (92) 43, Paris.
58. [OREDA, 2002] Offshore Reliability Data, 2002. Det Norsk Veritas, NO-1322 Hovik, Norway, 4th edition.
59. [Pérès et al., 2007] Pérès, F., Verron, S., Dejean, J.P., et Averbuch, D., 2007. "Formalisation d'une approche structurée de modélisation d'un système industriel complexe par Réseaux de Petri : Application aux systèmes de

production pétroliers offshore Ultra Grands Fonds". Oil & Gas Science and Technology – Rev. IFP, Vol. 62, No. 3, pp. 375-389.

60. [Perilhon, 2002] Perilhon, P., 2002. Du risque à l'analyse de risque – Mosar-, Méthode organisée et systématique d'analyse du risque, Ecole des Mines d'Alès, 177 p.
61. [Perrow, 1999] Perrow, C., 1999. Normal Accident: Living with High-Risk Technologies. Princeton University Press, 439 pp.
62. [Philippe, 2011] Philippe, T., 2011, MOCA-RP Manuel utilisateur 13.12, Total.
63. [Ramsay, 1999] Ramsay, C., 1999. Protecting your business: from emergency planning to crisis management. Journal of Hazardous Materials, 65(1999), 131-149.
64. [René et Hassane, 1992] René, D. & Hassane, A., 1992. Du Grafcet aux réseaux de Petri. Hermés.
65. [Roux-Dufort, 2003] Roux-Dufort, C., 2003. Gérer et décider en situation de crise, 2ème édition, Dunod, 243p.
66. [Smidts et Devooght, 1992] Smidts, C., Devooght, J., 1998. Probabilistic reactor dynamics- II : A Monte Carlo study of a fast reactor transient. Nuclear science and engineering, 111,p. 241-256.
67. [Stamatelatos, 2002] Stamatelatos, M., 2002. Probabilistic risk assessment procedures guide for NASA managers and practitioners. Note technique, NASA.
68. [US NRT, 2001] US National Response Team, 2001. Hazardous Materials Emergency Planning Guide, http://www.nrt.org/Production/NRT/NRTWeb.nsf/PagesByLevelCat/Level3GeneralNRTPublications?Opendocument
69. [Veach, 1997] Veach, E., 1997. Robust Monte Carlo methods for light transport simulation. A dissertation submitted to the department of computer science and the committee on graduate studies of Stanford University, For the degree of doctor of philosophy.
70. [Winkler, 1996] Winkler, R., 1996. Uncertainty in probabilistic risk assessment. Reliability Engineering and System Safety 54, 127 –132.

Evaluation de la performance du Plan Interne d'Intervention via les réseaux de Petri

***Résumé*—** Un système efficace de réponse à l'urgence est indispensable pour limiter les dégâts engendrés en cas de survenance d'un accident industriel majeur. Dans cette optique, les plans internes d'intervention PII sont des outils de planification adaptés en intégrant à la fois les ressources humaines, techniques et organisationnelles d'une manière cohérente.

A cet effet, l'analyse à priori des indicateurs de performance dudit système (efficacité, temps de réponse, niveau de confiance NC,….), est une étape importante pour améliorer leur performance opérationnelle.

Le présent mémoire a pour objectif la mise en œuvre d'outils de sûreté de fonctionnement les plus adaptés, pour analyser et évaluer qualitativement et quantitativement la performance du système de réponse à l'urgence de l'entreprise Sonatrach DP Hassi R'Mel, on fait appel au logiciel MOCA-RP, en modélisant le comportement dynamique du système.

Une étude exploratoire des documents EDD et PII de Sonatrach DP Hassi R'Mel a permis de retenir le scénario le plus représentatif (enveloppe) : Perte de confinement de GPL- Ballon 42-D108, Module Processing Plant MPP4.

***Mots clefs* —** Réponse à l'urgence; indicateurs de performance; MOCA-RP.

Performance assessment of an emergency response plan via petri net

***Abstract*—** an effective emergency response is essential to limit the damage caused by the occurrence of a major industrial accident. In this context, internal response plans IRP are tools for planning adapted by incorporating the human, technical and organizational coherently.

To this end, a priori analysis of performance indicators that system (efficiency, response time, confidence level CL....) is an important step to improve their operational performance.

This thesis aims to implement safety tools most appropriate, to analyse and evaluate qualitatively and quantitatively the performance of the emergency response system to the company Sonatrach DP Hassi R'Mel, we appealed to MOCA-RP software to modelling the dynamic behaviour of the system.

An exploratory study of the documents hazard study HS and IRP Sonatrach DP Hassi R'Mel allowed to retain the most representative (envelope) scenario: Loss of containment of LPG vessel 42- D108, Module Processing Plant MPP4.

***Key words* —**Emergency response; performance indicators; MOCA-RP.