



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche Scientifique



Université 20 août 1955 – Skikda
Faculté de technologie
Département de génie des procédés
Réf : D012125024D

جامعة 20 أوت 1955 سكيكدة
كلية التكنولوجيا
قسم هندسة الطرائق

THESE

Présentée pour l'obtention du grade de

DOCTEUR- LMD

En

Hygiène et Sécurité Industrielle

Option : Automatisation et contrôle en industrie pétrochimique

Présentée par

MESLOUB Khouloud

Vers une approche quantitative d'évaluation des performances des plans internes d'intervention à l'aide des réseaux de petri stochastiques

Soutenue publiquement le : 02/06/2025 Devant le jury composé de :

Nom	Grade	Position	Université
MARSA Zoubida	MCA	Présidente	Université 20 Août 1955-Skikda
INNAL Fares	Professeur	Rapporteur	Université 20 Août 1955-Skikda
DUCQ Yves	Professeur	Co-rapporteur	Université de Bordeaux
BAHMED Lilya	Professeur	Examinatrice	Université Batna 2
ZENNIR Youcef	Professeur	Examineur	Université 20 Août 1955-Skikda
BENAISSA Amina	MCA	Examinatrice	Université 20 Août 1955-Skikda

2024- 2025

*"It does not matter how slowly
you go as long as you do not stop"*

"Don't count the days, make the days count"

Remerciements

La réalisation de cette thèse a été possible grâce mon Dieu qui nous éclair le bon chemin.

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements et toute ma gratitude à mon encadreur INNAL Fares, professeur à l'Institut Des Sciences Et Techniques Appliquées à SKIKDA, 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 cette thèse, tout en me faisant profiter de sa culture et de sa rigueur scientifique.

Je désire aussi remercier SONATRACH DE SKIKDA, qui m'ont fourni les outils nécessaires accomplir ma thèse.

Je tiens à remercier Madame MARSA Zoubida, Maître de Conférences classe A à l'université de SKIKDA, pour avoir accepté d'être présidente du jury de cette thèse.

Mes remerciements vont aussi à Monsieur ZENNIR Youcef, Professeur à l'Université de SKIKDA, Madame BAHMED Lilya, Professeur à l'Université de BATNA, Madame BENAÏSSA Amina Maître de Conférences à l'Université de SKIKDA et Monsieur DUCQ Yves professeur à l'université de BORDEAUX , pour avoir accepté d'examiner cette thèse.

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

A mes parents...

A mon mari, mes sœurs

et mes frères

A ma fille Maria Ayla...

A ceux qui m'aiment...

A ceux que j'aime...

...khouloud

Résumé

Les exploitants industriels ont l'obligation d'assurer la protection des cibles potentielles que sont les personnes, l'environnement et les biens, même en cas de défaillance des barrières de sécurité préventives. Cette protection vise donc l'empêchement de l'escalade de la situation accidentelle initiale. Dans ce contexte, les plans internes d'intervention (PII) jouent un rôle majeur dans le processus de gestion des urgences, car il en constitue le premier niveau d'intervention. Une attention particulière doit donc être portée lors de leur élaboration et de leur mise en œuvre, afin d'assurer une efficacité maximale des opérations d'intervention. A ce titre, l'objectif de ce travail doctoral est le développement d'une approche structurée permettant une quantification la plus réaliste possible de la performance des plans d'urgence. Pour ce faire, nous avons dans un premier temps modélisé les différentes étapes de déroulement d'un PII relatif à un scénario d'incendie initié par une fuite de gazoline à l'aide de deux approches de modélisation fonctionnelle communément utilisées, à savoir : l'IDEF0 et le PBMN. L'IDEF0 permet de préciser les entrées, sorties, outils support et les contraintes qu'il est nécessaires de respecter lors des opérations d'intervention, tandis que le BPMN permet de rendre compte des aspects temporels (durées d'exécution) et d'autres considérations telles que certaines relations logiques entre les entrées et sorties. Ensuite, afin de considérer certains aspects dynamiques tels que le comportement fonctionnel et dysfonctionnel des équipements d'intervention, nous avons mis à profit les réseaux de Petri stochastiques (RdPS) couplés à la simulation de Monte Carlo. Cette utilisation conjointe permet la modélisation des systèmes complexes (à l'image des PII) de même que l'estimation quantitative des indicateurs de performance qui s'y associent. Les résultats obtenus en termes de probabilités de réalisation de certains événements et des instants de leur occurrence montrent l'efficacité de la stratégie d'intervention objet de l'étude.

Mots-clés :

Plan d'intervention interne (PII), modélisation fonctionnelle, IDEF0, PBMN, réseaux de Petri stochastiques (RdPS), simulation de Monte Carlo.

Abstract

Even if preventive safety barriers fail, industrial operators are responsible for ensuring the protection of potential targets such as people, environment and property. This protection is therefore intended to prevent the initial accident situation from escalating. In this context, Internal Intervention Plans (IIPs) play an important role in the emergency management process, as they represent the first level of intervention. Therefore, special attention must be paid to their development and implementation to ensure that the intervention measures are as effective as possible.

for this purpose, the objective of this doctoral work is to develop a structured approach allowing the most realistic quantification possible of the performance of emergency plans. To do this, we first modeled the different stages of the progress of an IIP relating to a fire scenario initiated by a gasoline leak using two commonly used functional modeling approaches, namely: IDEF0 and PBMN. IDEF0 allows specifying the inputs, outputs, support tools and constraints that must be respected during intervention operations, while BPMN allows accounting for temporal aspects (execution times) and other considerations such as certain logical relationships between inputs and outputs. Then, in order to consider certain dynamic aspects such as the functional and dysfunctional behavior of intervention equipment, we used stochastic Petri nets (SPNs) coupled with Monte Carlo simulation. This joint use allows the modeling of complex systems (like PIIs) as well as the quantitative estimation of their performance indicators. The results obtained in terms of probabilities of realization of certain events and the times of their occurrence show the effectiveness of the intervention strategy subject of the study.

Keywords:

Internal intervention plan (PII), functional modeling, IDEF0, PBMN, stochastic Petri nets (SPNs), Monte Carlo simulation.

ملخص

يقع على عاتق المشغلين الصناعيين التزام بضمان حماية الأهداف المحتملة، وهي الأفراد والبيئة والممتلكات، حتى في حالة فشل حواجز السلامة الوقائية. وتهدف هذه الحماية إلى منع تفاقم الوضع الناتج عن الحادث الأولي. في هذا السياق، تلعب الخطط الداخلية للتدخل (PII) دورًا رئيسيًا في عملية إدارة الطوارئ، حيث تُشكّل المستوى الأول من التدخل. لذا يجب إيلاء اهتمام خاص عند إعدادها وتنفيذها لضمان أقصى فعالية لعمليات التدخل.

وفي هذا الصدد، فإن الهدف من عمل الدكتوراه إلى تطوير منهجية تسمح بقياس أداء خطط الطوارئ بشكل واقعي قدر الإمكان. ولهذا الغرض، قمنا في البداية بنمذجة المراحل المختلفة لتنفيذ خطة تدخل داخلي (PII) مرتبطة بسيناريو حريق ناتج عن تسرب للبنزين، باستخدام طريقتين من طرق النمذجة الوظيفية الشائعة، وهما : IDEF0 و BPMN. يتيح طريقة IDEF0 تحديد المدخلات والمخرجات والأدوات الداعمة والقيود التي يجب احترامها أثناء عمليات التدخل، بينما تسمح طريقة BPMN بأخذ الجوانب الزمنية (مثل مدد التنفيذ) بعين الاعتبار، بالإضافة إلى بعض العلاقات المنطقية بين المدخلات والمخرجات.

بعد ذلك، ومن أجل مراعاة بعض الجوانب الديناميكية مثل السلوك الوظيفي وغير الوظيفي لمعدات التدخل، استخدمنا الشبكات بترى العشوائية (RdPS) المقترنة بمحاكاة مونت كارلو. وتتيح هذه المقاربة المشتركة نمذجة الأنظمة المعقدة (مثل خطط التدخل الداخلي) وكذلك التقدير الكمي لمؤشرات الأداء المرتبطة بها. وقد أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها من حيث احتمالات وقوع بعض الأحداث وتوقيت حدوثها، فعالية استراتيجية التدخل موضوع الدراسة.

الكلمات المفتاحية:

خطة التدخل الداخلي (PII)، النمذجة الوظيفية، IDEF0، BPMN، شبكات بيتري العشوائية (RdPS)، محاكاة مونت كارلو.

Table des matières

Remerciements.....	I
Résumé.....	II
Table des matières	V
Liste des figures	IX
Liste des tableaux	XII
Abréviation, Acronymes	XIII

Introduction Générale

Introduction générale	1
-----------------------------	---

Chapitre 1 : Etat de l'art sur la gestion des risques et des crises

1.1. Introduction.....	5
1.2. Gestion des urgences.....	5
1.3. Concept de la sécurité.....	6
1.3.1. Concept de danger.....	6
1.3.2. Etude de dangers.....	6
1.3.3. Concept de risque.....	7
1.3.4. Concept de sécurité.....	8
1.3.5. Sécurité fonctionnelle.....	8
1.4. Principe de la sûreté de fonctionnement.....	9
1.5. Gestion des risques.....	11
1.6. Facteurs humains et organisationnels en sécurité industrielle.....	11
1.6.1. Contexte.....	11
1.6.2. Facteurs humain dans la sécurité.....	12
1.6.3. Types d'erreur humaine.....	14
1.7. Processus de gestion des urgences.....	15
1.7.1. Prévention.....	15

1.7.2. Préparation.....	15
1.7.3. Intervention.....	17
1.7.4. Rétablissement.....	17
1.8. Développement des plans de réponse à l'urgence.....	18
1.9. Conclusion.....	20

Chapitre 2 : Plan interne d'intervention (PII)

2.1. Introduction.....	21
2.2. Stratégie de réponse aux urgences.....	21
2.3. Contexte organisationnel et normatif du plan d'intervention interne dans les établissements industriels.....	23
2.3.1. Référentiels normatifs	23
2.3.2. Disposition réglementaire en Algérie.....	24
2.4. Plan Interne d'Intervention (PII).....	25
2.4.1. Intérêt du plan interne d'intervention.....	26
2.4.2. Objectif général d'un plan interne d'intervention	26
2.4.3. Elaboration du PII.....	27
2.4.4. Mise en œuvre du PII.....	28
2.4.5. Missions prises en compte dans les PII.....	28
2.4.6. Approches d'évaluation de la performance des PII.....	31
2.5. Méthodologie de modélisation itérative des plans d'urgence industriels et de leurs défaillances.....	33
2.5.1. Robustesse des plans d'urgence industriels.....	33
2.5.2. Analyse des risques basés sur un modèle fonctionnel.....	34
2.5.3. Retour d'expérience et analyse des plans d'urgence industrielle.....	35
2.6. Influence des facteurs humains sur le PII.....	36
2.6.1. Compétences.....	36
2.6.2. Formation.....	36
2.6.3. Attitude.....	36
2.6.4. Motivation.....	36

2.7. Conclusion.....	37
----------------------	----

Chapitre 3 : Modélisation Fonctionnelle Des PII A L'aide Des Approches IDEF0 et BPMN

3.1. Introduction.....	38
3.2. Description de l'approche IDEF0.....	38
3.2.1. Concepts fondamentaux.....	38
3.2.2. Langage graphique IDEF0.....	40
3.3. Diagramme BPMN.....	41
3.3.1. Objets de flux.....	42
3.3.2. Objets de relation.....	46
3.3.3. Partitions (<i>Swimlanes</i>).....	47
3.3.4. Artefacts.....	48
3.4. Modélisation du PII à l'aide de l'IDEF0 et BPMN.....	48
3.4.1. Description du cas d'étude.....	49
3.4.2. Modélisation du PII par l'approche IDEF0.....	52
3.4.3. Modélisation du PII par l'approche BPMN.....	54
3.5. Conclusion.....	57

Chapitre 4 : Modélisation Du PII à L'aide Des Réseaux De Petri Stochastiques (RDPS)

4.1. Introduction.....	59
4.2. Introduction aux réseaux de Petri (RdP).....	59
4.2.1. Structure statique d'un RdP.....	60
4.2.2. Structure dynamique d'un RdP.....	60
4.2.3. Autres extensions des RdP.....	61
4.2.4. Marquage du RdP.....	63
4.3. Simulation de Monte Carlo.....	64
4.4.1. Introduction.....	64
4.4.2. Exemple illustratif : couplage entre RdPS et simulation Monte Carlo.....	67
4.4. Modélisation du PII à l'aide des RdPS.....	71
4.4.1. Description détaillée du scénario accidentel et du déroulement de l'intervention.....	71

4.4.2.Modélisation du déroulement des interventions PII via les RdPS.....	75
4.4.3.Evaluation des indicateurs de performance d'intérêt.....	83
4.5. Conclusion.....	86

Conclusion générale

Conclusion générale	87
---------------------------	----

Références

Références.....	89
-----------------	----

Liste des figures

Chapitre 1

Figure 1.1 :	Critère de Farmer	08
Figure 1.2 :	Taxonomie de la sûreté de fonctionnement	10
Figure 1.3 :	Processus de gestion des risques	11
Figure 1.4 :	Facteurs humains basé sur le modèle IOGP	13
Figure 1.5 :	Processus de gestion des urgences et des crises	15
Figure 1.6 :	Procédure de mise en place de plans de réponse à l'urgence	18

Chapitre 2

Figure 2.1 :	Système de gestion des urgences et des crises	22
Figure 2.2 :	Structure des communications entre les niveaux	23
Figure 2.3 :	Etapes de l'élaboration du PII	27
Figure 2.4 :	Schéma général d'organisation	29
Figure 2.5 :	Plan d'alerte, schéma de principe	30
Figure 2.6 :	Modèle structuro-fonctionnel d'un Plan d'Opération Interne (POI)	32

Chapitre 3

Figure 3.1 :	Décomposition structurée	39
Figure 3.2 :	Relation entre parent et enfant	39
Figure 3.3 :	Représentation de l'ensemble boîte-flèche	40
Figure 3.4 :	Interfaces entre plusieurs boîtes	41
Figure 3.5 :	Types des événements : (a) Début (b) Intermédiaire (c) Fin	42
Figure 3.6 :	Attributs des événements	43
Figure 3.7 :	Aperçu sur les causes du déclenchement et du résultat	44
Figure 3.8 :	(a) Sous-Processus (b) Tâche	45
Figure 3.9 :	(a) Boucle (b) Instance Multiple (c) Exécutions libre (Ad Hoc) (d) Compensation	45
Figure 3.10 :	Types de portes	46
Figure 3.11 :	(a) Flux de séquence de base (b) Flux de séquence conditionné (c) Flux de séquence par défaut.	47
Figure 3.12 :	Flux de messages	47

Figure 3.13 :	(a) association non orienté (b) association orienté	47
Figure 3.14 :	Représentation des Pools et Lanes	48
Figure 3.15 :	Types d'artefacts	48
Figure 3.16 :	Sphère de stockage de Gazoline 76-MD-03	49
Figure 3.17 :	Lignes de réception et de transfert de la sphère 76-MD-03	49
Figure 3.18 :	Distances d'effets liées à la suppression (sphère 76-MD-03)	50
Figure 3.19 :	Réseau anti incendie	51
Figure 3.20 :	Digramme PII (contexte : A0)	53
Figure 3.21 :	Processus de déclenchement du PII	53
Figure 3.22 :	Déroulement des interventions dans le PII	54
Figure 3.23 :	Modélisation du PII en BPMN	55
Figure 3.24 :	Résultats de la simulation du modèle BPMN (temps de réalisation)	55

Chapitre 4

Figure 4.1 :	Structure statique d'un RdP	60
Figure 4.2 :	Structure dynamique d'un RdP	61
Figure 4.3 :	Arc inhibiteur et arc de poids nul	62
Figure 4.4 :	Exemples de transitions valides ou non	63
Figure 4.5 :	Délai de tir	64
Figure 4.6 :	Exemples de marquage après franchissement	64
Figure 4.7 :	Etapas d'une procédure de Monte Carlo	67
Figure 4.8 :	RdPS relatif au cas illustratif	70
Figure 4.9 :	Génération d'un délai aléatoirement selon une loi exponentielle	70
Figure 4.10 :	Isolation de la sphère	72
Figure 4.11 :	Scénario d'escalade	73
Figure 4.12 :	Interface graphique du module Petri (logiciel GRIF)	76
Figure 4.13 :	Occurrence de la fuite	76
Figure 4.14 :	Ronde opérateurs	76
Figure 4.15 :	Équipement de détection automatique	77
Figure 4.16 :	Processus d'activation de l'alarme fuite	78
Figure 4.17 :	Processus d'isolation procédé et maîtrise des sources d'ignition	78
Figure 4.18 :	Canons de circonscription de la fuite	79
Figure 4.19 :	Processus de déclenchement du feu flash	79

Figure 4.20 :	Processus de circonscription de la fuite	80
Figure 4.21 :	Disponibilité réseau incendie	80
Figure 4.22 :	Camions d'intervention	81
Figure 4.23 :	Disponibilité des moyens d'intervention	81
Figure 4.24 :	Processus d'extinction du feu	81
Figure 4.25 :	Evolution des probabilités relatives aux : activation de l'alarme, circonscription de la fuite, disponibilité des moyens de lutte et l'isolement du procès	83
Figure 4.26 :	Evolution des probabilités relatives à certains événements	84
Figure 4.27 :	premiers instants d'occurrences des différents événements	85

Liste des tableaux

Chapitre 3

Tableau 3.1 : Caractéristiques physiques de la gazoline (pentane est majoritaire) **50**

Tableau 3.2 : Récapitulatif des différents éléments du BPMN et temps d'exécution **56**

Chapitre 4

Tableau 4.1 : Données relatives au déroulement de l'intervention **74**

Tableau 4.2 : Les différentes variables utilisées **82**

Liste des acronymes et abréviations

CEI	Commission Electrotechnique Internationale (International Electrotechnical Commission)
EDD	Etude De Danger
APR	Analyse Préliminaire Des Risques
AMDEC	Analyse Des Modes De Défaillances, De Leurs Effets Et De Leur Criticité
HAZOP	Étude De Danger Et D'Opérabilité (Hazard And Operability Study)
AdD	Arbre Des Défaillances
AdE	Arbre Des Evénements
IOGP	Association Internationale Des Producteurs De Pétrole Et De Gaz (International Association of Oil and Gas Producers)
PII	Plan Interne d'Intervention
PIM	Plan d'Intervention Médicale
PAM	Plan d'aide mutuelle
PCO	Poste de Commande Opérationnel
PCT	Poste de Commande Tactique
PCS	Poste de Commande Stratégique
ICS	Système de Commandement des Incidents
ORSEC	Organisation des secours
FIS	Fonctions – Interactions – Structure
IDEF0	Définition de l'Intégration pour la Modélisation des Fonctions (Integration Definition for Function Modeling)
BPMN	Modèle et Notation des Processus Métier (Business Process Model and Notation)
RdP	Réseau de Petri
RdPS	Réseau de pétri stochastique
MOCA-RP	Monte-Carlo basé sur les réseaux de Petri
REX	Retour d'expérience
GNL1/K	Complexe de gaz liquéfié Skikda/ Algérie
SONATRACH	Société Nationale pour la Recherche, la Production, le Transport, la Transformation et la Commercialisation des Hydrocarbures

Introduction Générale

Introduction générale

De nos jours, le monde industriel est devenu plus sensible à la maîtrise des accidents en raison de leurs conséquences humaines, environnementales et matérielles graves et même catastrophiques [1]. En effet, les procédés industriels actuels peuvent engendrer des accidents qualifiés de majeurs (explosion, incendie, dégagement toxique, ...), du fait des produits dangereux traités ou stockés et des conditions opératoires sévères (pression, température, ...). Ce fait a clairement mis en avant la nécessité d'une approche de management des risques structurée et cohérente afin de garantir une protection suffisante des personnes, des biens et de l'environnement. Cette protection est assurée en prévenant l'occurrence des accidents et en minimisant leurs conséquences. A cette fin, une approche type de management des risques repose sur la conjonction de plusieurs barrières de sécurité : conception sûre, système de conduite et de régulation, différents systèmes de sécurité (soupapes de sécurité, système d'arrêt d'urgence, système de confinement, ...) et plans d'urgence.

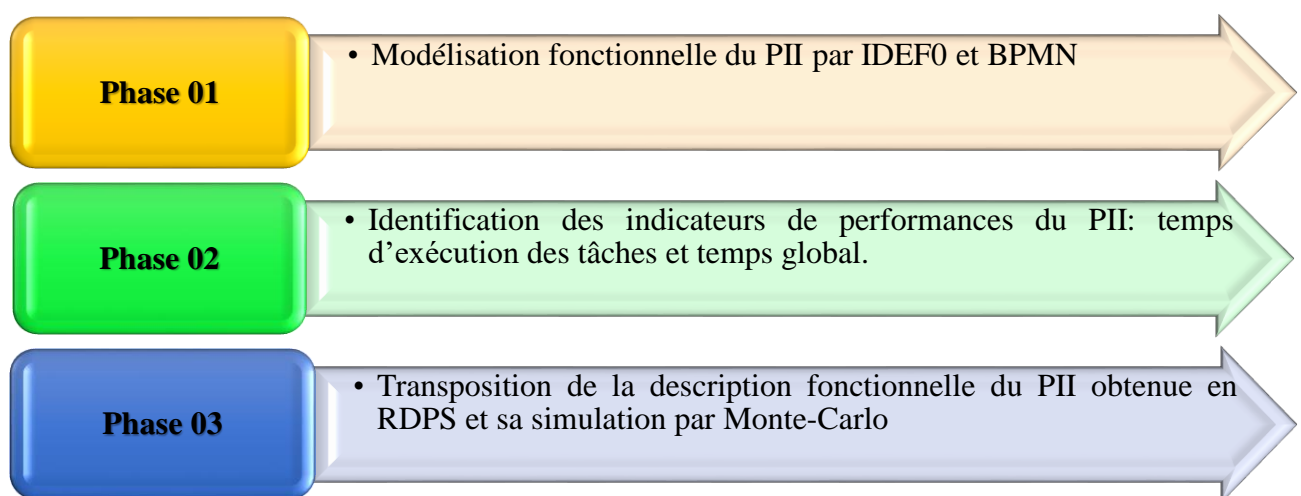
Afin de gérer efficacement ces barrières de sécurité, les approches quantitatives sont les plus préférées et même requises par les organismes de réglementation [2]. En effet, les approches quantitatives existantes, telles que QRA (*Quantitative Risk Assessment*), LOPA (*Layers of Protection Analysis*) et nœud papillon, fournissent des méthodologies bien structurées permettant la quantification de la fréquence des accidents sur la base des fréquences des événements initiateurs et des probabilités de défaillance des différentes barrières de sécurité existantes. Malheureusement, la performance du plan d'urgence, qui devrait être considérée comme un élément essentiel parmi ces barrières de sécurité, n'est pas prise en compte de manière appropriée dans la quantification de la fréquence des accidents. Cette non-considération effective des plans d'urgence est imputable à leur complexité induite par de fortes interactions entre des éléments humains, organisationnels et techniques. Par ailleurs, un plan d'urgence doit être exécuté sous des contraintes d'efficacité et de temps. Tous ces faits rendent également inopérants les outils classiques et analytiques de fiabilité (arbre des défaillances (AdD), chaînes de Markov, ...), car une définition mathématique exacte et précise du plan d'urgence n'est pas faisable.

Le besoin en termes de prise en compte de la performance des plans d'urgence est davantage motivé par son aspect obligatoire. En effet, la stratégie de maîtrise des risques industriels majeurs en Algérie, s'appuie entre autres sur un système de gestion et de planification de secours 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 [3]. Nous nous intéressons dans le cadre de ce travail doctoral à un type spécifique des plans d'urgence : le *Plan Interne d'Intervention (PII)* qu'est une

exigence réglementaire et doit être 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 efficace et perturber leur opérationnalité. La fréquence et l'impact de ces défaillances peuvent être réduits par l'analyse fonctionnelle des PII. Pour répondre même partiellement à cet objectif, des efforts considérables ont été consacré à l'évaluation de la performance des plans de réponse à l'urgence [4-9] , où des plusieurs approches ont été développées en se basant sur des outils génériques tels que le retour d'expérience (REX), les audits, modèles FIS (*Fonction-Interaction-Structure*). Cependant, ces derniers présentent certaines limites quant à l'évaluation quantitative de la performance en l'absence de méthodes d'analyse éprouvées. A ce titre, l'objectif assigné à cette thèse est de proposer une approche organisée pour l'évaluation quantitative de la performance des PII en mettant à profit l's approches de modélisation fonctionnelle et les réseaux de Petri stochastiques (RdPS), qui permettent de s'affranchir des inconvénients qui entachent les approches analytiques classiques.

L'objectif premier dévolu à ce travail doctoral est le développement d'une approche structurée permettant une quantification la plus réaliste possible de la performance des plans d'urgence. Plus particulièrement, nous nous intéressons à un type bien spécifique des plans d'urgence : plan interne d'intervention (PII). L'approche attendue devrait pouvoir quantifier a priori les critères de performance de ce dernier afin d'améliorer sa performance opérationnelle face à un accident majeur. Pour atteindre cet objectif ultime, plusieurs sous objectifs doivent être satisfaits, à savoir :



- **Phase 01:** Modélisation fonctionnelle du PII. Elle permet d'expliciter les différentes composantes du PII et surtout leurs interactions vis-à-vis de sa finalité. Nous sommes particulièrement intéressés par certaines approches de modélisation couramment utilisées, en l'occurrence: IDEF0 et BPMN. L'analyse fonctionnelle permet un modèle systémique du plan d'urgence en détaillant ses différentes étapes, leurs ressources respectives requises et leurs séquences.
- **Phase 02:** Identification des indicateurs de performance pertinents. Une fois qu'une idée claire est construite sur les aspects fonctionnels du PII, il s'agit ensuite de déterminer les critères sur lesquels le PII peut être évalué. Les indicateurs de performance relatifs au PII doivent être identifiés en fonction de l'accident pour lequel il a été établi: temps d'exécution, possibilité d'éviter les effets dominos, etc.
- **Phase 03:** Transposition de la description fonctionnelle du PII en réseau de Petri stochastiques (RdPS). Cela permet, d'une part, de prendre en compte le comportement dysfonctionnel des différentes parties constitutives du PII et d'évaluer correctement les indicateurs de performance recherchés. Il convient de noter que le modèle voulu devrait être flexible et maintenable de sorte que plusieurs options concernant les ressources et stratégies utilisées en cas d'accident puissent être testées et donc optimisées. L'usage des réseaux de Petri saurait garantir cette flexibilité, puisque ce formalisme est largement reconnu comme un outil adéquat et puissant pour modéliser des systèmes complexes en termes de concurrence (parallélisme), d'aspects séquentiels, de synchronisation, de partage de ressources et d'exclusion mutuelle (situations conflictuelles). Une évaluation correcte des indicateurs de performance du PII serait possible en couplant les RdPS à la simulation de Monte Carlo qui est reconnue comme le moyen unique de quantifier avec précision la performance des systèmes complexes.

Pour atteindre l'objectif annoncé, en plus de l'introduction générale, le travail doctoral sera organisé en quatre chapitres, décrits ci-après.

- **Le premier chapitre** sera consacré au concept de la gestion des crises dont la compréhension est nécessaire pour mener à bien la recherche doctorale: accidents industriels majeurs, sécurité des procédés, sécurité fonctionnelle (norme CEI 61508), gestion des risques, barrières de sécurité, étude de dangers (EDD), plans d'urgence et sûreté de fonctionnement des systèmes (SdF).
- **Le deuxième chapitre** sera destiné exclusivement au PII en termes de sa place dans le système de gestion des situations d'urgence de SONATRACH (*ICS: Incident Command System*), contexte règlementaire et normatif, démarche d'élaboration, organisation et approches existantes pour l'analyse de sa performance.

- **Dans le troisième chapitre** nous présenterons d'abord en détail les deux approches choisies pour réaliser la modélisation fonctionnelle du PII, à savoir l'IDEF0 et le BPMN. Cette présentation concerne leurs concepts fondamentaux et éléments de base (formalisme graphique). Ensuite, nous les mettrons en œuvre via la modélisation d'un PII relatif à un scénario d'incendie initié par une fuite de gazoline (complexe GNL1/K).
- **Le quatrième chapitre** abordera la modélisation des PII via les réseaux de Petri stochastiques (RdPS). Tout d'abord, une introduction concise aux réseaux de Petri sera donnée et illustrée. Ensuite, l'approche de Monte Carlo sera présentée et illustrée. Puis, le scénario d'accident introduit au chapitre précédent sera modélisé via les RdPS développés et simulé à l'aide de la simulation de Monte Carlo, afin de calculer de différents indicateurs de performance. Ce chapitre constitue une partie primordiale de la thèse.

Enfin, cette thèse est clôturée par une conclusion générale décrivant les principaux résultats de ce travail de recherche, ses limites et les perspectives de recherche envisagées.

Chapitre 1 :

*Etat de l'art sur
la Gestion des Risques
et des Crises*

1.1.Introduction

L'approche de gestion de crise repose sur des processus et des tactiques qui permettent à une organisation de reconnaître et de réagir avec efficacité face à une menace, un incident inattendu ou toute perturbation défavorable pouvant affecter les individus, les actifs ou les procédures opérationnelles. Les crises peuvent se produire à n'importe quel moment, qu'elles soient annoncées ou non, et elles peuvent se manifester sous diverses formes : désastres naturels, actions terroristes, conflits armés, cyberattaques, défaillances informatiques ou même pandémies à échelle mondiale. Au-delà des risques directs pour les individus, les biens et les procédures, les crises et incidents d'urgence critiques peuvent avoir des conséquences inattendues et entraîner une réaction en chaîne affectant le moral du personnel, l'image de la marque, la satisfaction des clients et même la chaîne d'approvisionnement. Cela dit, afin d'être prêt à réagir stratégiquement face à un événement qui se transforme en crise, il est nécessaire de mettre en place un plan de gestion de crise.

L'objet de ce premier chapitre est de présenter les concepts clés relatifs au domaine de la gestion des crises et des urgences afin de mieux appréhender le travail de recherche présenté dans ce manuscrit.

1.2. Gestion des urgences

La gestion des urgences est une nouvelle discipline dont il n'existe pas de définition standard. Certaines des définitions représentatives de la littérature sont les suivantes :

- **Définition 1** : donnée par l'Agence fédérale de gestion des urgences (FEMA) des États-Unis, la gestion des urgences est « *le processus de préparation, d'atténuation, de réponse et de récupération d'une urgence lorsqu'une catastrophe se produit* » [10].
- **Définition 2** : La gestion des urgences élimine les événements catastrophiques en mettant en œuvre une série d'activités, notamment la détection, la préparation, la planification, la diminution, l'intervention et le rétablissement [11].
- **Définition 3** : La gestion moderne des urgences est un processus consistant à appliquer des technologies et des méthodes de gestion modernes pour surveiller, répondre, contrôler et traiter efficacement les événements d'urgence, en intégrant diverses ressources sociales et en analysant scientifiquement la cause, le processus de développement et l'impact négatif des événements [12].

De ce qui précède, la gestion des urgences est une tâche complexe et multiforme qui implique une variété d'activités de gestion de la part des gestionnaires et des parties prenantes, afin de prévenir

les événements imprévus, de contrôler les dommages sociaux et d'éliminer les effets causés par les événements d'urgence.

1.3. Concept de la sécurité

Les installations industrielles mettent tout en œuvre pour prévenir la survenue d'accidents. Néanmoins, un grand nombre d'accidents industriels continuent de survenir à travers le monde (comme SEVESO en Italie en 1976, AZF à Toulouse en 2001,...) engendrant de nombreuses victimes et des dommages matériels et environnementaux. L'importance et la récurrence de ces incidents ont entraîné une multitude d'études de sécurité pour mieux gérer les risques [13]. Dans ce qui suit, nous exposons plusieurs concepts clés dans le secteur de la sécurité industrielle.

1.3.1. Concept de danger

La norme CEI 61508 [14] décrit le danger comme une menace potentielle susceptible de nuire aux biens (par dégradation ou destruction), à l'environnement, ou aux individus. Les risques peuvent affecter directement les individus, par le biais de lésions physiques ou de problèmes de santé, ou indirectement, via les dommages causés aux propriétés et à l'environnement.

Selon la norme OHSAS 18001 [15], un risque est une source ou une circonstance susceptible de causer des blessures ou des atteintes à la santé, des dommages matériels ou environnementaux sur le lieu de travail, ou une combinaison de ces facteurs. *Les risques associés à un système sont intrinsèques à son opérationnel ou à son dysfonctionnement.*

- Un événement risqué est une occurrence qui pourrait engendrer un préjudice,
- Un préjudice se définit comme une blessure physique, un impact sur la santé ou les possessions. On évoque les dommages corporels ou matériels.

De nombreux auteurs et dictionnaires utilisent le terme risque de manière interchangeable avec danger, ce qui peut expliquer l'usage indifférencié de ces deux expressions par diverses personnes.

1.3.2. Etude de dangers (EDD)

L'évaluation des dangers (EDD) est un élément fondamental de toute stratégie de gestion des risques, car elle contribue à optimiser la réponse d'urgence en cas de crise ou d'incident industriel majeur. Ceci est possible grâce à [16] :

- La minimisation des risques dès leur origine ;
- La gestion de situations d'urgence ;
- Le contrôle de l'urbanisation ;
- L'interaction et la communication avec le public.

- A responsabilité de l'exploitant de l'installation est engagée dans la réalisation de l'Étude de Danger (EDD), ce qui lui permet d'articuler ces thématiques majeures entre elles [16] :
- L'EDD repère, étudie et définit tous les phénomènes à risque qui pourraient survenir et entraîner un accident majeur : elle est ainsi responsable de la détermination des mesures de secours, qu'elles soient préventives ou protectrices.
- L'EDD présente aussi les technologies les plus avancées, offrant ainsi à l'industriel la possibilité de se positionner par rapport à celles-ci et facilitant son implication dans l'approche visant à diminuer le risque dès la source.
- Enfin, EDD remet aux autorités compétentes les informations techniques nécessaires pour délimiter les zones à risque autour de l'établissement et les impacts potentiels associés.

Ainsi, les plans d'urgence établis pour les installations à risque reposent sur l'identification et la caractérisation des accidents dangereux recensés et de leurs zones d'impact dans le cadre de l'étude des risques.

1.3.3. Concept de risque

Le risque est déterminé par la combinaison d'événements, comprenant les causes et les conséquences d'une situation spécifique. Les événements de cause sont définis par leur occurrence (P) tandis que les événements d'effet le sont par leur influence (I) [17]. Il peut le définir par l'évaluation des informations provenant de l'association de deux éléments : la sévérité d'un risque (ou son impact) et sa fréquence d'apparition. Il peut obtenir sa diminution par la prévention (diminution de la fréquence) ou la protection (diminution de la gravité) [13].

On trouve également la définition du terme risque dans divers documents normatifs. Par exemple, selon l'ISO 12100-1 [18], le risque représente « *la combinaison de la probabilité d'un dommage et de sa gravité* ». D'après la norme OHSAS 18001 [15] : un risque se définit comme « *la combinaison de la probabilité et de la conséquence de la survenue d'un événement dangereux spécifié* ».

Le risque se définit qualitativement par la dimension des préjudices suite à l'événement redouté, selon un standard de gravité généralement exprimé en termes comme dévastateur, critique, marginal, trivial, négligeable et également par son caractère imprévisible associé à la survenue d'un événement indésirable causant le dommage à partir d'une condition périlleuse établie [14].

De manière plus formelle, un risque peut être mesuré par sa criticité (C), qui est fonction de sa probabilité (P) et de sa gravité (G) :

$$C = G \times P \quad (1.1)$$

Le critère de Farmer permet de définir les notions de risque acceptables et inacceptables (figure 1.1) [14, 19].

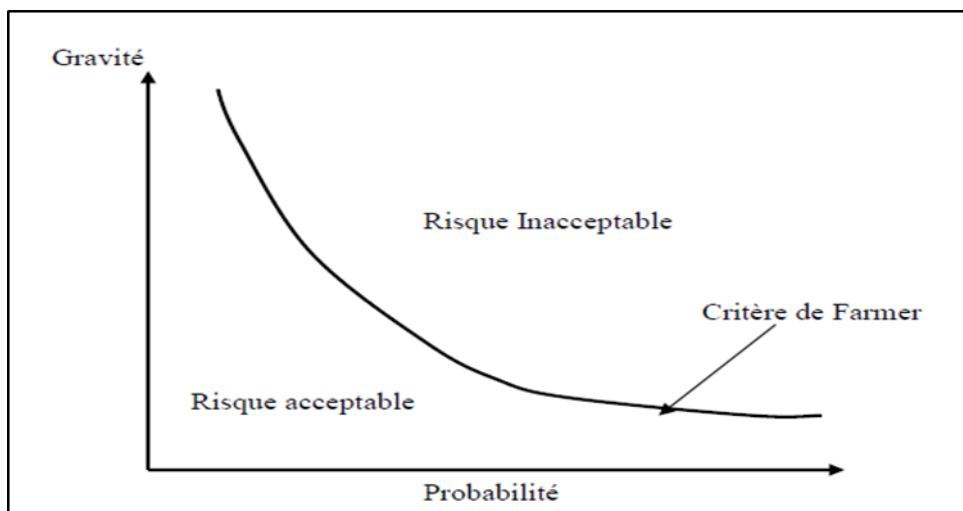


Figure 1.1 : Critère de Farmer [19]

1.3.4. Concept de sécurité

D'après la norme ISO, la sécurité consiste à ne pas *présenter un risque inacceptable*. Ce risque intolérable est attribué aux blessures ou préjudices de santé des individus, qu'ils soient directs ou indirects, découlant d'un préjudice causé au matériel ou à l'environnement [20].

La sécurité peut être également vue comme « *l'aptitude d'une entité à éviter de faire apparaître, dans des conditions données, des événements critiques ou catastrophiques* » [21].

Dans le contexte de la gestion des risques, le terme sécurité fait référence à la sécurité innocuité. La sécurité de confidentialité s'applique aux événements critiques tels que l'infiltration d'individus malintentionnés dans le champ des systèmes informatiques. La source [22] explicite ces deux éléments en ce qui concerne le paramètre sécurité : la sécurité innocuité (*safety*), associée à l'absence de conséquences désastreuses pour les individus, les biens et l'environnement, et la sécurité confidentialité (*security*), liée à l'absence de divulgations non autorisées d'informations et au respect intégral de ces informations. Dans ce travail de recherche, notre attention se porte exclusivement sur le premier aspect de la sécurité.

1.3.5. Sécurité fonctionnelle

Les normes CEI 61508 [14] et CEI 61511 [23] définissent la sécurité fonctionnelle comme « *un sous ensemble de la sécurité globale qui se rapporte au système commandé (EUC, Equipement Under Control) et qui dépend du fonctionnement correct du système électrique/électronique/électronique programmable (E/E/EP) relatif à la sécurité, des systèmes*

relatifs à la sécurité basée sur une autre technologie et des dispositifs externes de réduction de risque ».

L'objectif de la sécurité fonctionnelle est de maîtriser et contrôler les risques liés aux systèmes commandés.

1.4. Principes de la sûreté de fonctionnement

La sûreté de fonctionnement est la science de défaillances [24]. Elle englobe donc leur savoir, leur appréciation, leur anticipation, leur quantification et leur contrôle. C'est précisément la caractéristique qui autorise ses utilisateurs à avoir une confiance légitime dans la qualité du service fourni [25]. Les obstacles à la fiabilité opérationnelle : fautes, erreurs et défaillances représentent Une **défaillance** du système se produit lorsque le service fourni s'écarte de la réalisation de la fonction prévue du système, c'est-à-dire de l'objectif pour lequel il a été conçu. Une **erreur** représente l'élément de l'état du système qui peut causer une défaillance, en d'autres termes, une défaillance survient lorsque l'erreur atteint le point de contact du service offert et le modifie. Une **faute** est le facteur déterminé ou présumé d'une erreur. Ainsi, il y a une relation de cause à effet entre la faute, l'erreur et la défaillance.

La sûreté de fonctionnement englobe les attributs suivants :

- La **fiabilité** se définit comme la capacité d'une entité à réaliser une fonction demandée, sous des conditions spécifiques, sur une période déterminée.
- La **disponibilité**, c'est-à-dire la capacité d'une entité à accomplir une fonction requise dans des conditions spécifiques, à un moment précis ou pendant une période déterminée, en presumant que les ressources externes sont fournies.
- La **maintenabilité** se définit comme la capacité d'un élément à être entretenu ou remis en état, pendant une période déterminée, dans une condition permettant l'exécution d'une fonction requise, lorsque la maintenance est réalisée dans des conditions spécifiques, selon des procédures et des ressources définies.
- L'**intégrité**, qui se définit comme l'absence de modifications inappropriées des données,
- La **sécurité de la confidentialité** (ou immunité) qui signifie l'absence de divulgation non autorisée d'informations.
- La **sécurité innocuité**, qui se réfère à l'absence de conséquences désastreuses pour l'homme, l'environnement et les propriétés.

Le développement d'un système fonctionnel fiable requiert le recours conjoint à un éventail de techniques, désignées sous le nom de moyens de la sûreté de fonctionnement, pouvant être catégorisées en :

- *Prévention des fautes* : comment, dès la conception, prévenir ou empêcher l'apparition ou l'introduction d'erreurs.
- *Tolérance aux erreurs* : comment assurer, par le biais de la redondance, un service respectant les spécifications malgré les erreurs.
- *Suppression des erreurs* : comment réduire grâce à la vérification la présence d'erreurs.
- *Estimation des erreurs* : comment anticiper l'apparition, la genèse et les répercussions des erreurs.

Le schéma complet de la taxonomie de la sûreté de fonctionnement est donné à la (figure 1.2).

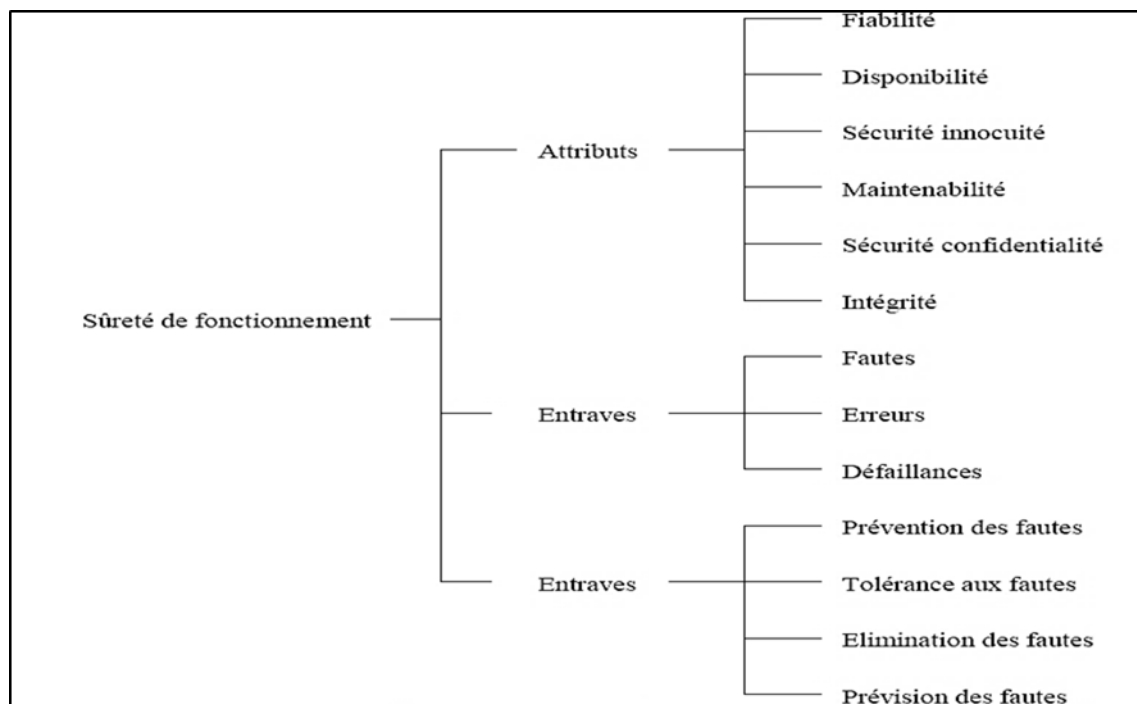


Figure 1.2 : Taxonomie de la sûreté de fonctionnement [25]

Plusieurs techniques sont employées dans le domaine de l'analyse de la fiabilité des systèmes pour cerner et/ou examiner les divers attributs mentionnés à la (figure 1.2). La majorité de ces techniques repose sur la division des grands systèmes en sous-systèmes ou éléments individuels dont les propriétés sont présumées être connues. L'examen de la fiabilité d'un système implique l'étude des pannes de ses composants afin d'évaluer leur impact sur le service offert par le système. Lors d'une évaluation de la sûreté de fonctionnement, plusieurs techniques sont couramment employées : l'Analyse Préliminaire des Risques (APR), l'AMDEC (Analyse des Modes de Défaillances, de leurs Effets et de leur Criticité), l'étude Hazard and Operability (HAZOP), l'Arbre des Défaillances

(AdD), l'Arbre des Événements (AdE) ainsi que les réseaux bayésiens. Nœud papillon, chaînes de Markov, réseaux de Petri, etc.

1.5. Gestion des risques

Le processus de gestion des risques implique que l'équipe en charge du programme/projet identifie, analyse, planifie, surveille, contrôle et rapporte efficacement les risques. D'après cette définition, la gestion des risques est décrite comme une démarche systématique et structurée en tant que processus itératif (voir figure 1.3). Elle a pour objectif de réduire l'impact des imprévus à un niveau jugé acceptable, en tenant compte des efforts déployés pour sa mise en œuvre. [26, 27].

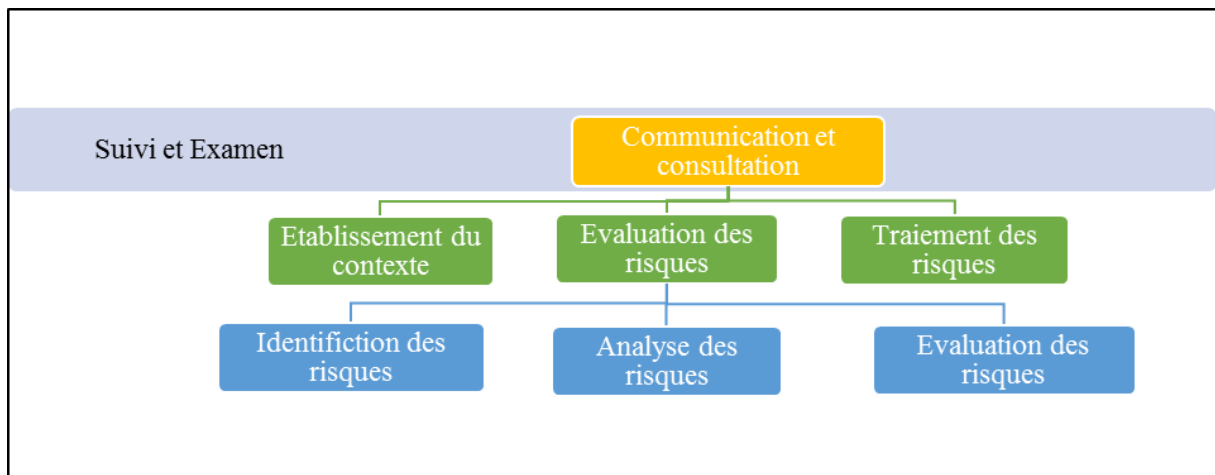


Figure 1.3 : Processus de gestion des risques

1.6. Facteurs humains dans la sécurité

1.6.1. Contexte

La complexité des systèmes industriels constitue un défi pour la sécurité, car elle peut être source de déviations dans le comportement du système. Ces écarts font eux-mêmes partie des causes attribuées aux incidents et accidents, surtout ceux qualifiés de majeurs dont les effets peuvent mettre en jeu un grand nombre de personnes, occasionner des dégâts importants et désorganiser fortement la société [28]. La complexité d'un système est liée aux aspects imprévisibles (et émergents) de son comportement qui résultent des interactions entre ses nombreux éléments (techniques, humains, organisationnels et environnementaux).

Les systèmes industriels ont tendance à être sujets aux accidents causés par des défaillances dans les interactions entre les composants, plutôt que par la simple défaillance d'un seul composant [29]. en raison des multiples relations entre les différents éléments du système. Ainsi, par exemple, la panne inattendue d'un composant peut être due à une mauvaise maintenance (facteur organisationnel) ou à l'utilisation d'un composant mal conçu (facteur technique). Les accidents ne

peuvent pas être simplement attribués à des actions humaines et qualifiés d'erreur humaine (le facteur humain). Lorsqu'un accident survient, la personne peut avoir suivi une ligne de conduite particulière parce que cela semblait être la bonne chose à faire dans cette situation, ou parce que la façon dont le système a été conçu signifiait que c'était la seule action qui lui était possible.

L'inclusion du facteur humain et de son environnement organisationnel dans la gestion des risques industriels est ici considérée comme essentielle à l'amélioration de la sécurité industrielle. Cet environnement contient cependant de nombreux facteurs qui affectent le comportement humain. L'analyse de telles situations révèle la nature complexe et diversifiée du problème, compte tenu de l'interaction entre les différents types de facteurs en jeu : psychologiques, psychosociaux, organisationnels et économiques. De plus, la complexité du comportement humain signifie qu'il ne peut pas être évalué quantitativement avec précision et certitude.

1.6.2. Facteurs humain dans la sécurité

Les facteurs humains sont un terme commun donné à la discipline largement reconnue consistant à traiter les interactions dans l'environnement de travail entre les personnes, une installation et ses systèmes de gestion (organisation). Dans ce qui suit, nous donnons quelques éléments clarifiant cette notion de facteurs humains. [30]

- Christensen [30] définit les facteurs humains et l'ergonomie comme suit : « *cette branche de la science et de la technologie qui comprend ce qui est connu et théorisé sur les caractéristiques comportementales et biologiques humaines qui peut être valablement appliqué à la spécification, la conception, l'évaluation, l'exploitation et la maintenance de produits et de systèmes pour améliorer une utilisation sûre, efficace et satisfaisante par individus, groupes et organisations* ».
- Le UK Health and Safety Executive [31] définit les facteurs humains comme suit : « *les facteurs environnementaux, organisationnels et professionnels, ainsi que les caractéristiques humaines et individuelles qui influencent le comportement au travail d'une manière susceptible d'affecter la santé et la sécurité* ».
- L'Association internationale des producteurs de pétrole et de gaz (IOGP : *International Association of Oil and Gas Producers*) [32] définit les facteurs humains comme suit : « *l'interaction des individus les uns avec les autres, avec les installations et les équipements et avec les systèmes de gestion* ».

Un modèle de base pour les facteurs humains relatifs aux industries de transformation est présenté dans la figure (1.4), fondé sur le modèle IOGP [32]. Ce modèle identifie trois domaines pour les

facteurs humains : les installations et équipements, les personnes et les systèmes de gestion. Ces domaines se chevauchent et ne peuvent pas être séparés ou supprimés du modèle.

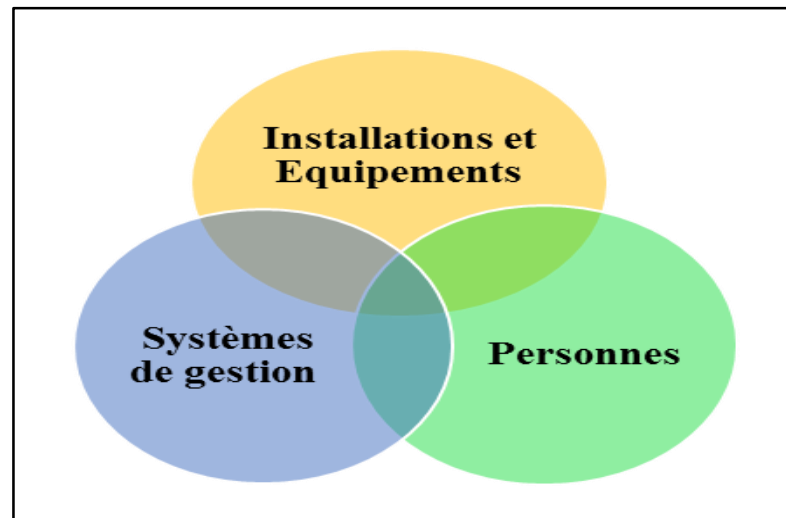


Figure 1.4 : Facteurs humains basé sur le modèle IOGP [32]

- Le domaine « *Installations et équipements* » comprend la prise en compte des caractéristiques physiques et de l'espace de travail, la conception et l'entretien de l'équipement ainsi que la fiabilité.
- Le domaine « *Personnes* » comprend la prise en compte des attributs individuels, des compétences, des perceptions et des facteurs liés à la condition physique, au stress et à la fatigue. Certains attributs, comme la personnalité, ne peuvent pas être modifiés, alors que d'autres compétences et attributs le peuvent. Les ordinateurs et les systèmes de contrôle jouent un rôle majeur dans le fonctionnement sûr et fiable des installations des industries de transformation. L'interaction entre les humains (domaine Personnes) et les ordinateurs (domaine Installations et équipements) est un aspect du chevauchement entre les domaines.
- Le domaine « des systèmes de gestion » fournit le cadre dans lequel le travail est effectué. Il comprend les procédures, la formation, les systèmes de travail liés à la sécurité des processus et les aspects de la culture de sécurité. La priorité sur tous ces domaines est la dimension culturelle et l'environnement de travail. Il existe des cultures nationales, locales et professionnelles ainsi que des facteurs sociaux et communautaires.

Les facteurs humains comportent de nombreux aspects, mais ils visent tous le même objectif : adapter la tâche et l'environnement à la personne plutôt que de forcer la personne à s'adapter de manière significative pour effectuer le travail.

1.6.3. Types d'erreur humaine

L'erreur humaine a décrit plusieurs types d'échecs humains : les dérapages, les erreurs et les violations. [33]

- **Les dérapages** : sont associés à une mauvaise exécution d'actions, où les actions ne se déroulent pas comme prévu. Dans ce cas, la personne sait exactement ce qu'elle a l'intention de faire, mais cela tourne mal à un moment donné en cours de route. Un exemple est celui d'un opérateur qui tape un mauvais numéro dans la console d'un système de contrôle, alors qu'il avait l'intention de saisir le bon numéro.
- **Lapsus** : sont associés à des échecs de mémoire. Encore une fois, l'intention est correcte mais les actions sont omises ou des parties de la séquence d'actions sont répétées. Ces erreurs ont tendance à se produire lors de l'exécution de tâches assez automatiques ou routinières dans un environnement familier, et l'attention est captée par autre chose que la tâche en cours. Les exemples incluent une mauvaise lecture d'un affichage, l'oubli d'appuyer sur un interrupteur ou une erreur accidentelle de mélanger la mauvaise quantité dans un réacteur discontinu.
- **Erreurs** : elles se produisent lorsque l'exécution est parfaite mais que le plan lui-même n'a pas atteint son objectif, soit parce qu'il était inapproprié à la situation, soit parce que la situation était nouvelle et qu'aucun plan n'était donc disponible. Un exemple est un mauvais diagnostic de l'interaction entre plusieurs variables de processus, puis en effectuant des actions incorrectes.
- **Les violations** : sont des situations dans lesquelles les opérateurs mènent délibérément des actions contraires aux règles et procédures organisationnelles. Ce n'est pas la même chose que les contrevenants au sabotage n'ont pas l'intention de causer du tort. L'opérateur peut ne pas suivre la procédure parce que, par exemple, les procédures peuvent être obsolètes ou peu pratiques. Il est également possible que la procédure semble avoir peu de valeur aux yeux des opérateurs ou que les superviseurs tolèrent de faire les choses d'une manière différente.

1.7. Processus de gestion des urgences

La gestion des urgences est un processus continu, dynamique, proactif, réactif et réflexif, structuré en quatre étapes distinctes : avant, pendant et après la crise. La figure(1.5) illustre ces quatre phases.

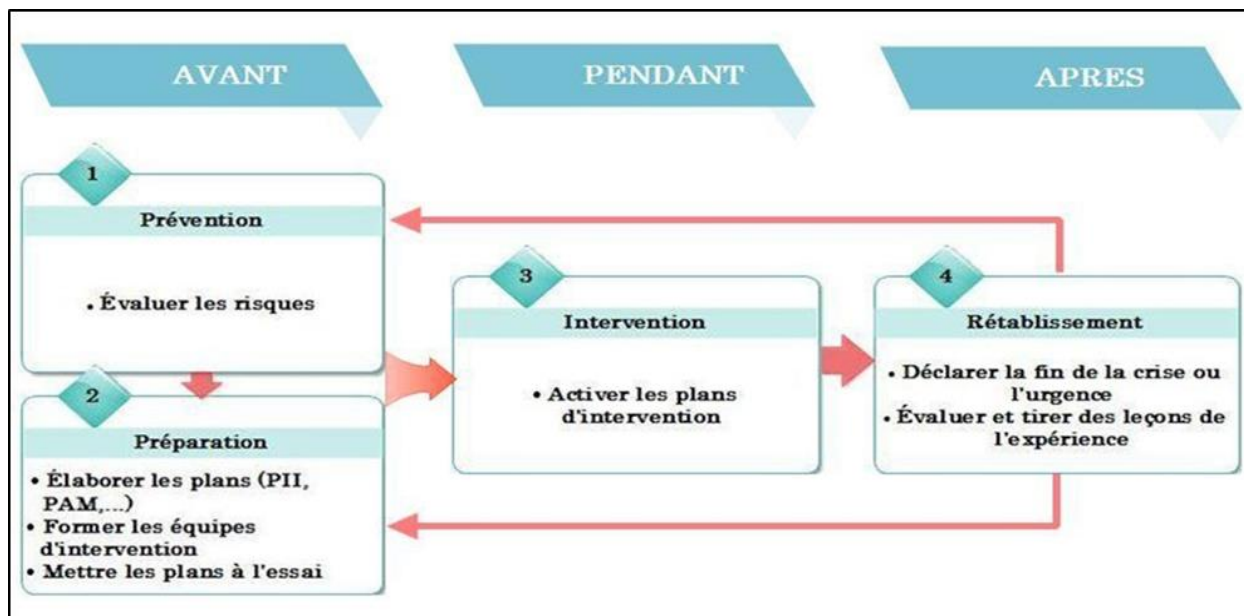


Figure 1.5 : Processus de gestion des urgences et des crises [34]

1.7.1. Prévention

La prévention constitue l'étape préliminaire du processus de gestion des situations d'urgence et des crises ou des incidents majeurs, et doit être établie avant l'événement d'une crise ou d'un incident majeur. Elle vise à réduire le risque d'une crise ou d'un accident majeur à un niveau acceptable et, lorsque c'est faisable, à empêcher la survenue effective de l'accident. Il s'agit d'initiatives persistantes destinées à atténuer ou supprimer les dangers pour les individus, les propriétés et l'environnement sur le long terme. Cela englobe les actions anticipatives mises en œuvre par les entités afin d'examiner et d'apprécier les degrés de risque et de menace dans une région donnée. À partir de ces recherches, des scénarios concernant les accidents et crises possibles sont conçus dans le but d'implémenter des mesures de prévention des risques [35].

1.7.2. Préparation

Ce concept fait référence aux mesures adoptées pour se préparer à réagir de manière efficace en cas de crise ou d'urgence, et réduire leur incidence sur les populations exposées. Elles comprennent en particulier l'élaboration de diverses sortes de plans d'intervention d'urgence et leur mise à l'épreuve. On peut citer, entre autres, les plans internes d'intervention « PII », d'assistance mutuelle

(PAM), d'intervention médicale (PIM) ou de sécurité (terrorisme et autres actes de malveillance). [35].

En fonction des évaluations de risques, les organisations vont planifier les ressources humaines et matérielles nécessaires pour gérer les scénarios prévus, définir les canaux de communication, mettre en place un réseau d'installations de réponse qui soutient la coordination des intervenants. Pour y parvenir, une série complète de plans est conçue pour assister les décideurs au moment opportun. Ces documents englobent divers scénarios de crise, des répertoires identifiant les différents intervenants, la composition des cellules de crise, les rôles et les objectifs de chacun [35]. Cette phase de préparation offre aussi l'opportunité d'entraîner les organisations grâce à des simulations et des formations spécifiques pour les équipes d'intervention. Cela vise à garantir la réactivité, la mise en œuvre rapide et le déploiement efficace des ressources indispensables pour faire face aux urgences potentielles, qui ont été anticipées dans les scénarios de risques prévus par les plans évoqués précédemment [35].

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 [35].

- **Planification basée sur des scénarios** : cette approche consiste à établir un scénario de référence pour chaque risque par le comité de planification. Un scénario constitue une représentation plus ou moins détaillée de la progression prévue de l'apparition d'un aléa naturel et/ou technologique. Par la suite, une étude menée sur ce scénario aide à élaborer les hypothèses clés du plan et à déterminer les actions générales et particulières à réaliser.
- **Planification basée sur les fonctions opérationnelles** : cette approche est également connue comme planification fonctionnelle. Elle facilite la reconnaissance des actions habituelles à entreprendre en cas de situation d'urgence. D'après ce modèle de planification, le comité de planification détermine les tâches à accomplir et désigne un ensemble d'autorités compétentes auxquelles la responsabilité de chaque tâche est déléguée.
- **Planification basée sur les capacités opérationnelles** : cette approche évalue la compétence de l'entité territoriale à mettre en œuvre une action. Le comité de planification s'interroge sur la consolidation des ressources humaines, des formations, des plans d'intervention d'urgence, de la structure organisationnelle, du leadership et de la direction, des équipements et

infrastructures en place, ainsi que de leur capacité à mettre en œuvre une opération. On considère généralement cette méthode comme un mélange des deux stratégies précédentes.

En fait, on utilise une approche hybride de planification. Cette méthode représente une fusion de divers éléments des trois méthodes antérieures. La méthode hybride permet de « transcrire » les risques repérés lors d'une analyse des risques réalisée précédemment (comme, par exemple, dans le contexte des risques technologiques, les études de danger liées aux installations industrielles) en scénarios d'accidents. Nous utilisons par la suite ces scénarios pour détecter les besoins opérationnels qui pourraient se présenter si un événement naturel et / ou technologique venait à se produire. Ces exigences opérationnelles représentent les buts à réaliser. Cette démarche aboutit à un schéma qui détaille les rôles, les interactions et les obligations des divers intervenants, de même que l'ordre des actions à réaliser. Ainsi, la méthode de planification hybride permet de déterminer les capacités d'un territoire en termes de gestion de situation d'urgence ; tout en étant basée sur une approche intégrale [35].

1.7.3. Intervention

La phase de la réponse opérationnelle débute par la mise en œuvre des plans d'intervention d'urgence suite à l'apparition d'un incident périlleux. Elle comprend toutes les mesures prises (action, secours et évacuation) pour gérer les répercussions d'une crise ou d'une urgence, assurer la sécurité des individus, sauvegarder les propriétés et minimiser l'impact de l'incident sur l'environnement. La réponse prend différentes formes selon la localisation, la durée et la sévérité des conséquences [34].

1.7.4. Rétablissement

Le retour à la normale est graduellement instaurée suite à la proclamation de l'achèvement de l'urgence ou de la crise, en minimisant leurs répercussions, en réduisant les conséquences sur l'environnement et les habitants locaux, ainsi qu'en évaluant et en apprenant de ladite expérience. L'objectif à long terme est de restaurer la normalité des systèmes, que ce soit dans les domaines environnemental, économique, de la réhabilitation des infrastructures ou autres [34].

La gestion des crises et urgences dans l'industrie algérienne fait appel à divers intervenants aux rôles clairement définis dans les plans d'intervention internes ou externes. La section suivante met l'accent sur l'exposé de la stratégie de réaction en cas d'urgence mise en œuvre lors des situations d'urgence et/ou de crise, avec un accent particulier sur les plans internes d'intervention « PII » [34].

1.8. Développement des plans de réponse à l'urgence

L'élaboration d'un plan de réponse aux situations d'urgence est souvent menée en tant que projet de grande envergure. De nombreux guides destinés aux comités de planification ont été publiés par des autorités nationales de divers pays [36, 37, 38], ainsi que par des entités nationales ou internationales de grande envergure [39, 40]. Ils recommandent de suivre une démarche générale pour élaborer un plan d'intervention en cas d'urgence. En général, cette méthode de planification comprend les étapes suivantes (figure 1.6).

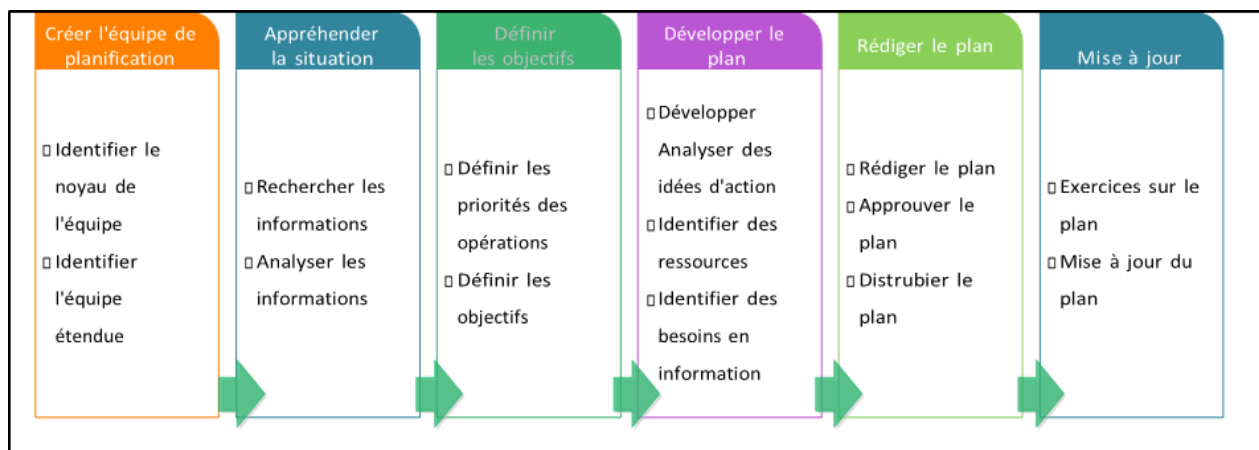


Figure 1.6 : Procédure de mise en place de plans de réponse à l'urgence [34]

- **Constituer l'équipe de planification** : un plan d'intervention d'urgence est élaboré conjointement par l'équipe. La mise en place d'une équipe de planification aide les différents intervenants à clairement établir leurs fonctions dans le système de gestion des risques [34].
- **Comprendre la situation** : ce stade représente l'aspect analytique du processus de résolution de problèmes et de prise de décisions. La première étape consiste à rechercher les informations pertinentes concernant les risques envisagés. Les premiers renseignements à cette étape sont fournis par les membres du comité de planification. Les analyses de risque sont une référence essentielle pour l'élaboration du plan. La seconde partie concerne l'évaluation des données, dans le but d'établir les faits et les suppositions qui serviront à déterminer les besoins opérationnels [34].
- **Établir les objectifs** : en se basant sur les données recueillies lors de la phase précédente, on élabore des scénarios d'accidents. L'élaboration de scénarios aide à identifier les nécessités opérationnelles qui dictent les mesures à entreprendre et les moyens requis pour cela. Les trois buts principaux de la gestion d'une catastrophe sont : secourir et sauvegarder les individus, préserver les biens et défendre l'environnement. La priorité absolue des opérations d'urgence suite à toute catastrophe est la sauvegarde de la vie humaine. Pour réaliser ces trois

objectifs, il est impératif de mener des actions opérationnelles significatives dès la survenue de l'événement. Les besoins opérationnels découlant de l'incident se répartissent entre ceux générés par l'incident lui-même et ceux engendrés par sa gestion. Les exigences engendrées par l'incident sont celles qui découlent directement du phénomène dangereux. Ils se manifestent pendant ou immédiatement après la survenue de l'incident [34].

- **Elaborer le plan** : à ce stade, des solutions potentielles pour atteindre les objectifs définis pendant l'étape précédente sont recherchées. La technique de planification hybride est employée pour démontrer l'évolution du scénario sur une période donnée et repérer les moments clés de prise de décision, les activités à mener, les moyens nécessaires pour leur réalisation et les exigences en termes d'information. [39].
- **Rédiger et approuver le plan** : après la mise en place de l'idée opérationnelle, les résultats du travail sont convertis en un plan écrit. Le document devrait être concis et clair, pour permettre une compréhension aisée par tous les intervenants concernés. Un document est partagé avec les organisations qui ont un rôle à jouer dans la mise en œuvre du plan pour obtenir leur feedback et validation. Après réception des commentaires, le document définitif est approuvé par les Elus ou le délégué de l'Etat, conformément aux procédures réglementaires. Des duplicatas du document sont distribués aux parties prenantes et une liste de distribution est conservée pour garantir la communication des mises à jour [39].

Mettre en œuvre et actualiser le plan : la mise en application du plan lors d'un incident véritable, ainsi que les simulations, contribuent à mesurer son efficacité. En outre, ils servent à former les intervenants en gestion de crise et aux modalités du plan, mais contribuent également à détecter les dysfonctionnements dans l'application du plan et à mettre en place les ajustements nécessaires [39].

En plus des ajustements basés sur le retour d'expérience (rapports de simulations et d'accidents réels), des actualisations du plan s'avèrent aussi indispensables suite à des évolutions significatives de la situation ou lorsque la loi en cours l'exige [39].

1.9. Conclusion

Nous avons consacré ce chapitre à la présentation des concepts principaux dans le domaine de la gestion des risques et surtout ceux liés au processus de gestion des urgences. L'objet du second chapitre est de présenter en détail un plan spécifique de réponse aux urgences : plan interne d'intervention (PII). Le PII représente un outil nécessaire pour la maîtrise des risques d'accidents majeurs. Dans le prochain chapitre nous décrivons ses différentes parties constitutives telles que définies dans les documents officiels.

Chapitre 2 :

*Plan Interne
D'Intervention
(PII)*

2.1. Introduction

La gestion efficace des risques industriels repose aujourd'hui sur diverses procédures analytiques, réglementaires ou non (quantification et qualification). Cela englobe l'évaluation des risques d'accidents pour estimer leurs impacts sur les installations industrielles ou sur la communauté environnante, ainsi que les systèmes de gestion et les évaluations de sécurité. Dans tous les systèmes en place, le plan d'urgence constitue l'une des protections finales et cherche à déterminer, en situation de catastrophe majeure, les mesures de sécurité les plus adaptées à la protection des individus, de l'environnement et des infrastructures.

Le plan d'intervention interne (PII) est considéré comme un document nécessaire pour les exploitants d'installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE) ou relevant d'une activité hydrocarbures et ce pour organiser la réponse à apporter aux situations accidentelles sur un site industriel, en vue de limiter les conséquences sur les personnes, les biens et l'environnement. Il est élaboré par l'exploitant, en collaboration avec les services de secours extérieurs. Il doit être régulièrement mis à jour en fonction de l'évolution des risques et des moyens disponibles.

A cet effet, nous intéressons dans ce chapitre à l'étude complète des parties constitutives du PII qui sont de trois natures : organisationnelle, humaine et technique. L'interaction entre elles sera également détaillée.

2.2. Stratégie de réponse aux urgences

Le système de gestion des urgences de SONATRACH, connu sous le nom de Système de Commande d'Incident (ICS), favorise une meilleure coordination entre les diverses entités concernées et permet une mobilisation rapide des ressources humaines et matérielles requises pour les interventions. Il précise aussi les fonctions et obligations pour chaque échelon de l'organisation. L'ICS est mis en œuvre à trois échelons de gestion selon la sévérité de l'incident (figure 2.1) [41].

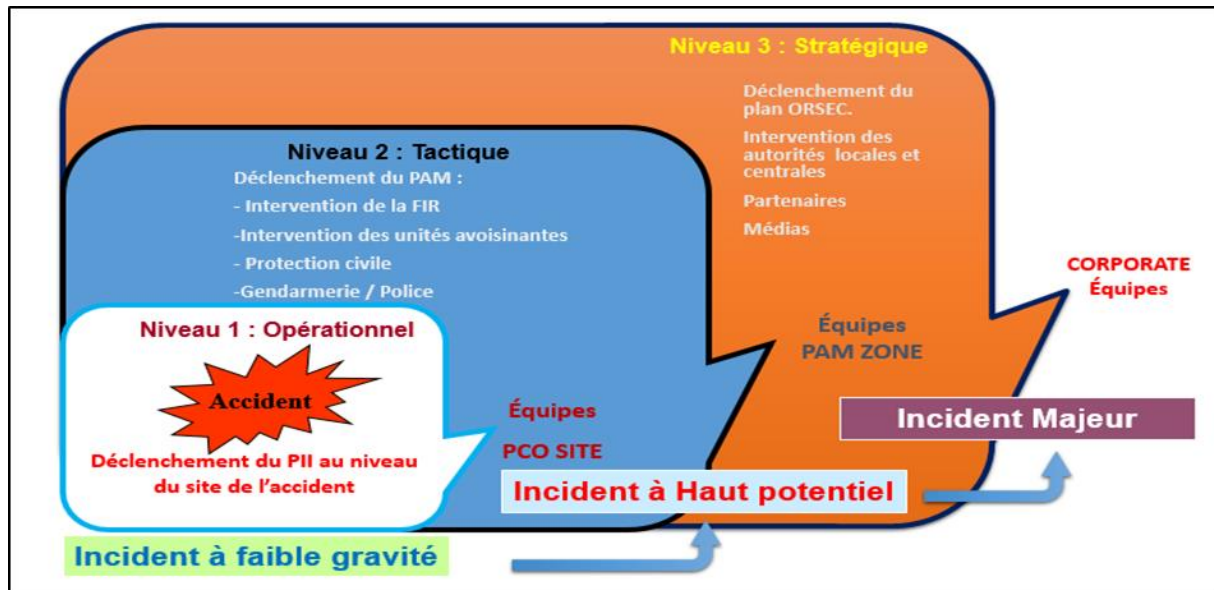


Figure 2.1 : Système de gestion des urgences et des crises [41]

- **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 supervisé par le Bureau de Direction des Opérations Internes Locales et le Poste de Commande Opérationnel (PCO) sur le site touché [42].
- **Niveau 2 - Plan d'Aide Mutuel (PAM)** : Ce niveau a pour objectif de réduire l'impact de l'incident à l'échelle régionale et de garantir une coordination locale de l'opération en collaboration avec les autres endroits proches de l'incident. Il est supervisé par le Poste de Commandement Tactique (PCT) (Direction des Opérations Internes Régionales) [42].
- **Niveau 3 - Plan de Gestion de Crise, ORSEC** : on rôle comprend la coordination de tous les incidents, la liaison avec les parties concernées, ainsi que le suivi des opérations et engagements commerciaux et autres en cas d'urgence ou de crise. C'est le Poste de Commande Stratégique, situé au niveau central (PCS), qui en assure la supervision (Direction des Opérations Internes Nationales) [42].

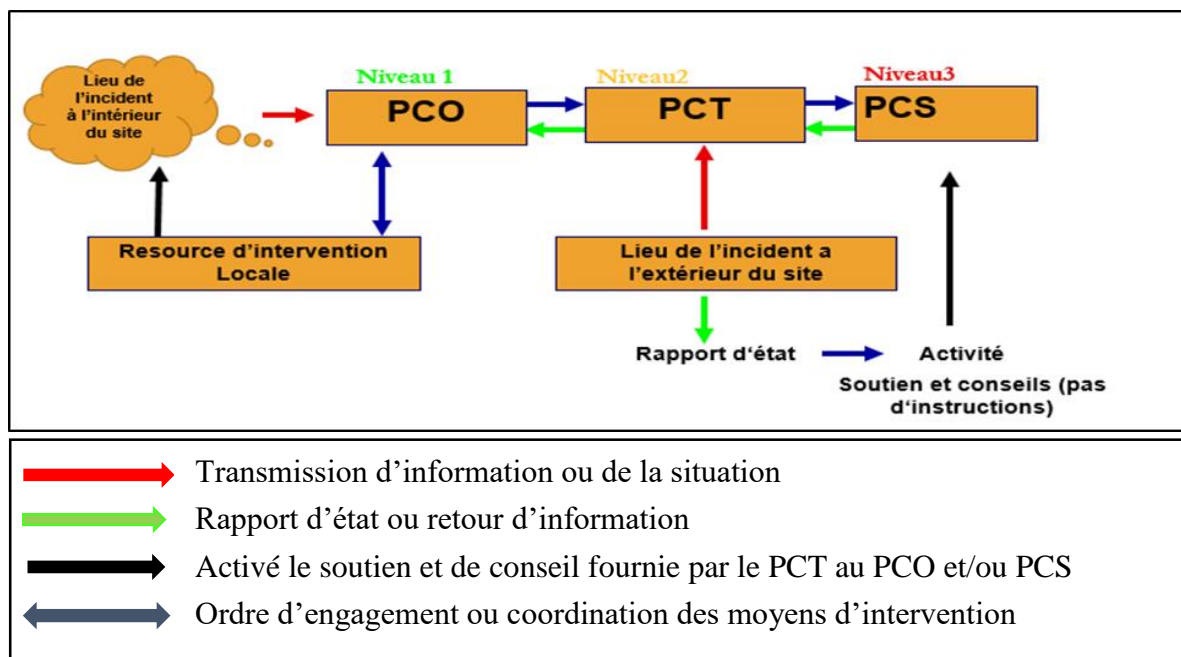


Figure 2.2 : Structure des communications entre les niveaux [42]

2.3. Contexte organisationnel et normatif du plan d'intervention interne dans les établissements industriels

2.3.1. Référentiels normatifs

- **OHSAS 18001 [43]** : ce référentiel inclut des exigences en matière de gestion des urgences :
 - L'organisme doit mettre en place et maintenir des plans et procédures pour évaluer la probabilité d'incidents et de situations d'urgence, ainsi que sa capacité à intervenir afin de prévenir et minimiser les maladies et blessures potentielles qui pourraient y être liées.
 - L'organisme est tenu de réévaluer ses stratégies et protocoles de prévention des urgences et de réaction, spécifiquement suite à un incident ou une situation d'urgence.
 - L'organisme doit également tester régulièrement ces procédures lorsque cela est possible.
- **Organisation Internationale du travail (OIT) [44]** : En 2001, elle a publié un cadre de gestion de la santé et de la sécurité au travail. Il est nécessaire de mettre en place et de maintenir à jour des exigences relatives à la gestion des urgences, incluant des mesures de prévention, de préparation et d'intervention en cas d'urgence. Ces actions visent à détecter les potentiels accidents et situations d'urgence pour prévenir les dangers associés à la sécurité et à la santé au travail. Il faudrait que les actions envisagées prennent en compte la dimension de l'organisation et le type de ses opérations. Elles devraient :

- Garantir la diffusion d'informations, la communication interne et la coordination indispensables pour assurer la sécurité de tous en cas de situation d'urgence sur le lieu de travail.
 - Transmettre l'information et établir une communication avec les autorités compétentes, les services d'intervention locaux ainsi que les services d'urgence.
 - Prévoir les interventions de premiers secours et l'aide médicale, les outils pour combattre les incendies ainsi que l'évacuation de tous les individus présents sur le site de travail.
 - Informer et former de façon appropriée tous les membres de l'organisation, à tous les niveaux, y compris par le biais d'exercices périodiques de prévention, de préparation et d'intervention en cas d'urgence.
- **Norme de management de l'environnement ISO 14001 [45]** : Elle aussi consacre tout un paragraphe à la préparation aux situations d'urgence :
 - L'organisme est tenue de définir, d'appliquer et de maintenir à jour une ou plusieurs procédures pour détecter les situations d'urgence possibles et les incidents susceptibles d'affecter l'environnement, ainsi que pour déterminer la manière d'y réagir.
 - L'organisme est tenue d'intervenir en cas d'urgence et d'accidents réels, tout en prévenant ou atténuant les effets négatifs sur l'environnement.
 - L'organisme est tenue de procéder à une révision régulière et, si besoin, d'ajuster ses procédures relatives à la gestion et à la réaction face aux situations d'urgence, surtout suite à des incidents ou des crises.
 - L'organisme doit également tester périodiquement de telles procédures lorsque cela est réalisable.

2.3.2. Disposition réglementaire en Algérie

Suite aux différents accidents qui ont survenus à travers le monde et particulièrement dans le territoire national et dans le cadre de prévention des risques majeurs et la gestion des catastrophes, un processus réglementaire a été mise en place par l'Etat Algérien. Il s'agit en particulier de [42] :

- Décret n° 85-231 du 25 août 1985 fixant les conditions et modalités d'organisation et de mise en œuvre des interventions et secours en cas de catastrophes,
- Décret n° 85-232 du 25 août 1985 relatif à la prévention des risques de catastrophes,
- Décret exécutif n°96-158 du 04 Mai 1996 fixant les conditions d'application des dispositions de sûreté interne d'établissement,

- La loi n° 03-10 du 19 Joumada El Oula 1424 correspondant au 19 juillet 2003 relative à la protection de l'environnement dans le cadre du développement durable,
- La loi n° 04-20 du 13 Dhou El Kaada 1425 correspondant au 25 décembre 2004 relative à la prévention des risques majeurs et à la gestion des catastrophes dans le cadre du développement durable. l'Art. 62 s'intéresse aux plans particuliers d'intervention, les exploitants d'installations industrielles doivent élaborer un plan interne d'intervention définissant, au titre de l'installation concernée, l'ensemble des mesures de prévention des risques, les moyens mobilisés à ce titre ainsi que les procédures à mettre en œuvre lors du déclenchement d'un sinistre,
- Le décret exécutif n° 06-198 du 4 Joumada El Oula 1427 correspondant au 31 Mai 2006 définissant la réglementation applicable aux établissements classés pour la protection de l'environnement,
- Décret exécutif n° 07-144 du 2 Joumada El Oula 1428 correspondant au 19 mai 2007 fixant la nomenclature des installations classées pour la protection de l'environnement,
- Décret exécutif n° 09-335 de l'Aouel Dhou El Kaada 1430 correspondant au 20 octobre 2009 fixant les modalités d'élaboration et de mise en œuvre des plans internes d'intervention par les exploitants des installations industrielles,
- Arrêté interministériel du 17 Dhou El Kaada 1431 correspondant au 25 octobre 2010 fixant le canevas relatif à l'élaboration du plan interne d'intervention.

2.4. Plan Interne d'Intervention (PII)

Plusieurs pays, y compris l'Algérie comme nous l'avons récemment observé, exigent l'élaboration de plans de réponse d'urgence pour garantir une réaction efficace en cas d'accidents industriels majeurs [46]. Ce plan a été conçu en suivant les directives du Décret exécutif 09-335 du 20/10/2009, qui définit les procédures d'élaboration et de mise en œuvre des plans internes d'intervention par les opérateurs des installations industrielles [42].

Le PII est conçu pour structurer l'organisation des secours et des interventions lors d'un sinistre sur le site. Il est destiné à assurer la sécurité du personnel, des citoyens et de l'environnement environnant, et précise les actions à entreprendre pour empêcher que la catastrophe ne s'aggrave. Le PII, fondé sur l'analyse des risques, établit les conditions de gestion d'un incident et de ses répercussions. Il précise, en fonction des scénarios d'accidents majeurs, l'organisation pour l'alerte, les secours et les interventions. Il comprend aussi les mesures à appliquer pour communiquer avec 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.

Le PII détaille pour chaque situation la tactique d'intervention, les premières actions à entreprendre, le processus de l'attaque et les ressources requises à chaque étape de l'intervention. Les dangers d'aggravation de la situation sont repérés, les directives à suivre et les précautions à prendre sont signalées.

2.4.1. Intérêt du Plan Interne d'Intervention (PII)

En plus de servir de guide au cours d'une situation d'urgence, le PII offre d'autres bénéfices. Effectivement, la conception de ce plan peut aider à identifier des circonstances passées non remarquées qui pourraient aggraver une situation critique et les supprimer. La planification aide à identifier et à rectifier les manques, comme le déficit en ressources (matériel, personnel compétent, fournitures), avant qu'une situation ne se présente. De plus, un PII favorise la sensibilisation à la sécurité et met en évidence l'engagement de l'organisation pour la protection de ses employés.

L'absence d'un tel plan pourrait provoquer des pertes importantes, comme de multiples victimes et possiblement la cessation d'activité de l'organisation. Il y a ceux qui adoptent la stratégie de l'autruche, affirmant que « cela ne se produira pas ici ». Il est possible que les individus ne soient pas disposés à investir le temps et les efforts requis pour analyser la question. Néanmoins, la préparation pour les situations d'urgence reste un facteur crucial dans la gestion d'une entreprise. Étant donné que les situations d'urgence peuvent se produire, il est crucial de s'y préparer. En cas d'urgence, l'impératif de prendre des décisions instantanément, conjugué au manque de temps, de moyens et de personnel compétent peut conduire à la confusion. En raison du moment de survenue et des circonstances, on ne peut pas suivre la chaîne normale de commandement ni compter sur les moyens de communication habituels. Le stress provoqué par la situation peut altérer le jugement, ce qui peut entraîner des pertes importantes [46].

2.4.2. Objectif général d'un Plan Interne d'Intervention (PII)

Le plan interne d'intervention précise les marches à suivre pour gérer les situations imprévues et soudaines. Les objectifs du PII est de [46] :

- Servir comme document de base et d'assistance pour la prise en charge d'un incident,
- Prévenir les accidents mortels et les blessures,
- Réduire les dommages causés aux bâtiments, aux stocks et à l'équipement,
- Protéger l'environnement et la communauté,
- Accélérer la reprise des activités normales,

- D'identifier l'ensemble des moyens humains et matériels à mettre en œuvre, en cas d'incident et fixer les conditions de leur mise en œuvre,
- De constituer un document officiel répondant aux exigences réglementaires,
- De fournir des données écrites qui faciliteront l'implication des entités de soutien pendant l'urgence,
- De fournir une base pour l'amélioration continue de la performance en gestion des urgences sur le site,
- De développer les moyens et les méthodes disponibles pour réduire l'impact d'un événement potentiel,
- Travailler en conformité avec le décret 09-335, la loi 04-20 et le décret exécutif 06198,

2.4.3. Elaboration du PII

L'élaboration du PII doit être réalisée par une équipe pluridisciplinaire composée de représentants de l'entreprise, des services de secours et des autorités locales. La démarche d'élaboration du PII doit suivre les étapes suivantes [47].

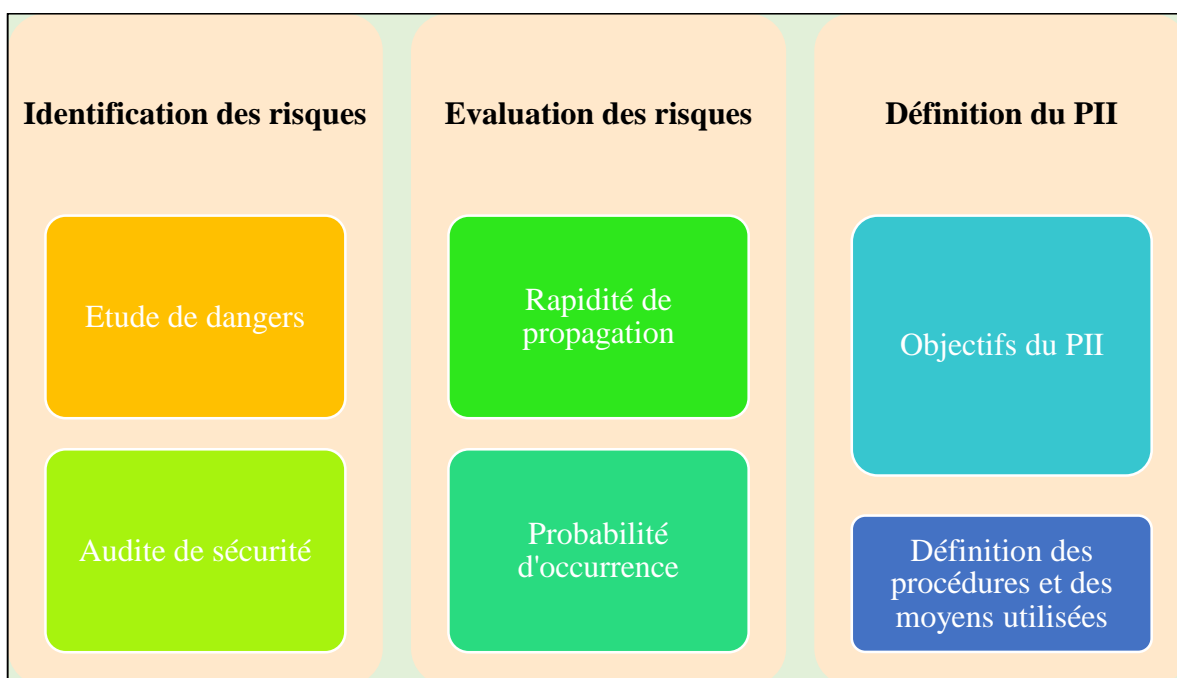


Figure 2.3 : Etapes de l'élaboration du PII

- **Identification des risques :** cette étape permet de déterminer les risques auxquels l'entreprise est exposée. Cette identification peut être réalisée à partir d'une étude de dangers, d'un audit de sécurité ou d'un simple recensement des accidents survenus dans l'entreprise.

- **Evaluation des risques** : elle permet de mesurer l'importance des risques identifiés. Cette évaluation peut être réalisée à partir de critères tels que la gravité des conséquences, la probabilité d'occurrence ou la rapidité de propagation.
- **Définition des objectifs du PII** : cette étape permet de déterminer ce que le PII doit permettre de faire. Ces objectifs doivent être cohérents avec les risques identifiés et évalués.
- **Définition des procédures et des moyens** : cette étape permet de décrire comment les objectifs du PII seront atteints. Ces procédures et ces moyens doivent être adaptés aux risques identifiés et évalués.
- **Validation du PII** : la validation du PII permet de s'assurer que le PII est complet, cohérent et efficace. Cette validation doit être réalisée par une équipe pluridisciplinaire composée de représentants de l'entreprise, des services de secours et des autorités locales.

2.4.4. Mise en œuvre du PII

La mise en œuvre du PII doit être assurée par l'entreprise. Cette mise en œuvre doit comprendre les étapes suivantes [48] :

- **Information et formation du personnel** : le personnel de l'entreprise doit être informé du PII et formé à sa mise en œuvre.
- **Réalisation d'exercices** : la réalisation d'exercices permet de tester le PII et de le faire évoluer si nécessaire.
- **Mise à jour du PII** : le PII doit être mis à jour régulièrement pour tenir compte des modifications de l'entreprise ou des risques.

2.4.5. Missions prises en compte dans les PII

Le PII structure une organisation d'assistance en trois phases (les équipes d'intervention, un Centre Opérationnel de Commandement, un Siège de Direction des Opérations Internes) qui est instaurée au sein de l'établissement (voir figure 2.4), la coordination avec les autres plans (PAM, ORSEC, Crise, etc.) ainsi que la collaboration avec les divers acteurs impliqués dans l'incident. Il décrit la configuration de cette entité, le rôle précis de chaque participant et les relations hiérarchiques entre les diverses parties impliquées [49].

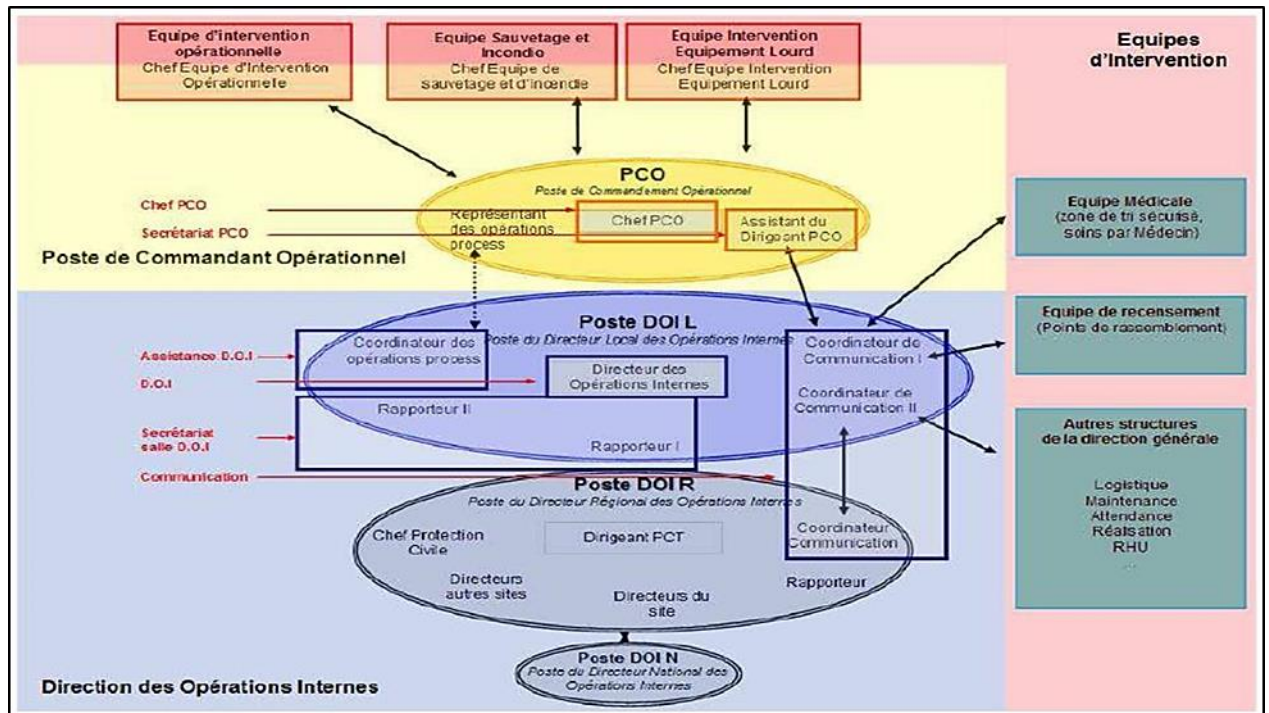


Figure 2.4 : Schéma général d'organisation [49]

Les principales missions prises en compte dans le cadre des PII sont :

- Activation du PII :** l'alerte est la fonction la plus importante, car elle garantit l'activation du PII. Ce document établit la chaîne d'alerte qui reflète la logique adoptée sur le site en matière de structuration des communications et de mobilisation des parties prenantes. Ce processus débute par la détection d'un incident grâce à des outils automatisés ou à un observateur. Dès qu'un incident est identifié, une alerte est transmise à tous les intervenants du PII, qui sont alors activés. Finalement, une fois que la situation est maîtrisée, la clôture de l'incident est annoncée par le niveau hiérarchique adéquat (voir figure 2.5) [46, 50].
- Direction des opérations internes :** Le rôle du responsable des opérations internes sur place comprend la gestion des urgences en prenant toutes les mesures nécessaires pour limiter l'incident, la supervision complète des actions de communication (en interne, avec les autorités, les médias et la famille), l'approbation de la stratégie d'intervention, l'organisation des secours, le suivi et la mise à jour des autorités et administrations concernées concernant le déroulement potentiel de l'événement, la collecte d'informations et la coordination avec les divers intervenants. Le Poste de Direction des Opérations Internes Local (PDOIL) supervise, guide et organise la gestion de l'incident sur le lieu d'événement tout au long de son déroulement [42].

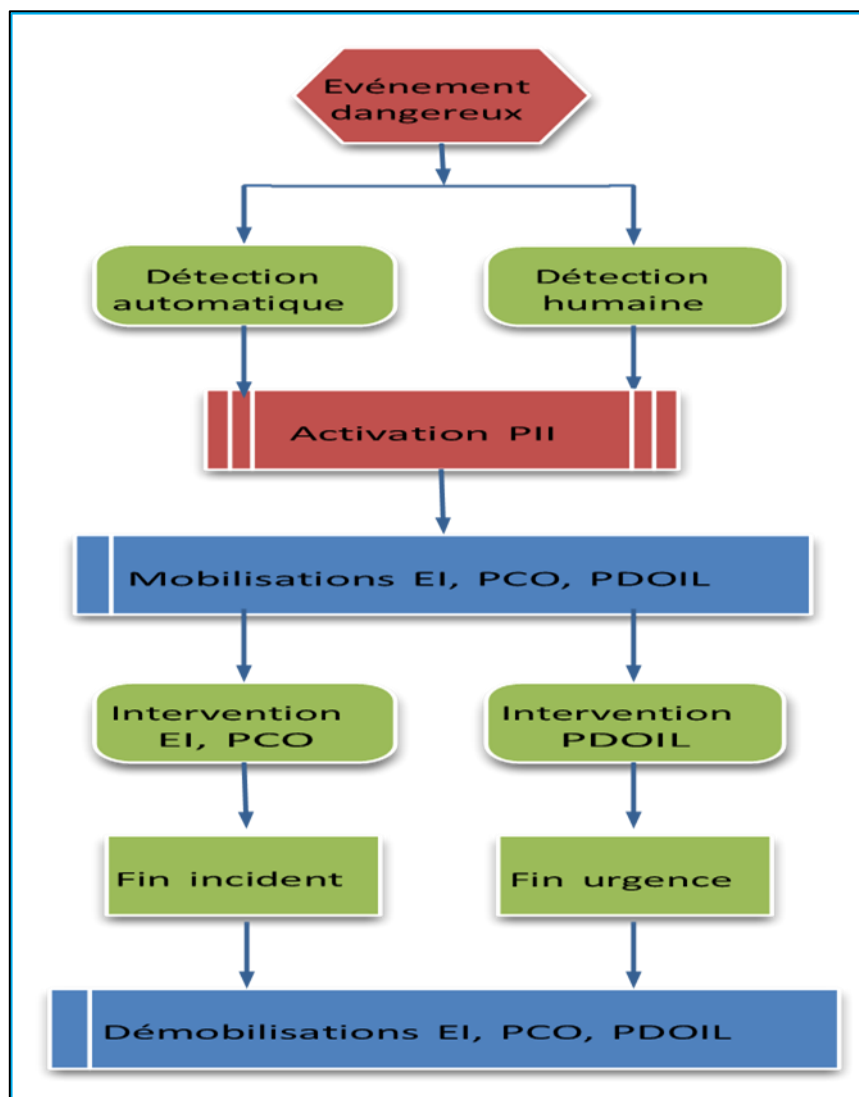


Figure 2.5 : Plan d'alerte, schéma de principe [50]

- Commandement opérationnel** : le rôle du commandement opérationnel est de diriger l'intervention sur le terrain tout en ayant une perspective d'ensemble des opérations actuelles et des dangers de réactions en chaîne ou d'accidents supplémentaires. Le Centre de Commandement Opérationnel supervise l'analyse, l'anticipation et la mise en œuvre, collecte les données relatives à la situation et à l'évolution du sinistre et de l'intervention, conçoit les stratégies d'intervention, met en œuvre les décrets du DOI, veille au bon flux d'informations, conduit et coordonne les équipes d'intervention sur le lieu des événements.
- Intervention** : Les équipes d'intervention (incendie, opérationnel, etc.) présentes sur le lieu de l'événement assurent la mission d'intervention. Les équipes de lutte contre les incendies mettent en œuvre la tactique d'intervention après approbation par D.O.I. Elles se chargent de l'intervention initiale, du sauvetage, des premiers secours et de l'évacuation des blessés, tout

en protégeant les installations avoisinantes. De plus, elles déterminent les ressources à mobiliser et estiment le temps requis pour leur déploiement. Pour ce dernier aspect, une courbe d'intensification est employée à cette fin [41]. 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.

2.4.6. Approches d'évaluation de la performance des PII

Comme nous l'avons déjà mentionné, l'objet premier de ce travail doctoral est l'évaluation quantitative de la performance des PII. Dans la littérature, il existe trois approches d'évaluation de la performance des PII, à savoir :

- **Evaluation 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. Les exercices de simulation sont des outils essentiels pour juger l'efficacité globale des mesures prévues dans le PII. En effet, la mise en pratique simulée du plan offrira aux participants l'occasion d'appliquer leurs connaissances théoriques, de se familiariser avec leurs fonctions et responsabilités en cas d'urgence et de valider les différentes procédures mises en place dans le PII [51].

Dans ce contexte, la législation algérienne impose la réalisation d'au moins deux exercices de simulation PII par an (décret 09-335, article 15) [52]. 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 [53].

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 [46]. 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 philosophie, les méthodes et les techniques opérationnelles [46].

- **Evaluation des PII par l'audit**

L'approche d'évaluation des PII par audit repose sur l'examen direct de la performance du plan en recourant à des interrogations basées sur les critères définis par un panel d'experts nombreux [54]. La performance est jugée en fonction de questions spécifiques sur l'excellence du plan, sur la prise en compte de tous les critères définis dans la méthode, et aussi sur l'aptitude du plan à satisfaire aux contraintes réglementaires. Des notes sont attribuées aux réponses à ces interrogations, et une note globale est générée. Bien que pragmatique et pertinente, cette approche souffre d'un manque de structure. L'identification des facteurs à examiner repose sur l'expertise et ne considère pas la structure des PII. En outre, le calcul du score global s'effectue par addition des points obtenus pour chacune des questions et ne prend pas en compte l'importance relative des différents aspects du plan [46].

- **Evaluation des PII par le modèle FIS**

La méthode d'analyse de la robustesse des PII, basée sur la technique FIS, a été élaborée par l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne [55]. Cette étude a utilisé l'outil informatique (XRisk) conçu pour la modélisation structurelle et fonctionnelle ainsi que l'évaluation des risques dans les systèmes complexes. L'analyse a été structurée par le modèle, ce qui a permis d'identifier les éventuelles défaillances lors de la gestion de crise (voir figure 2.6) [55].

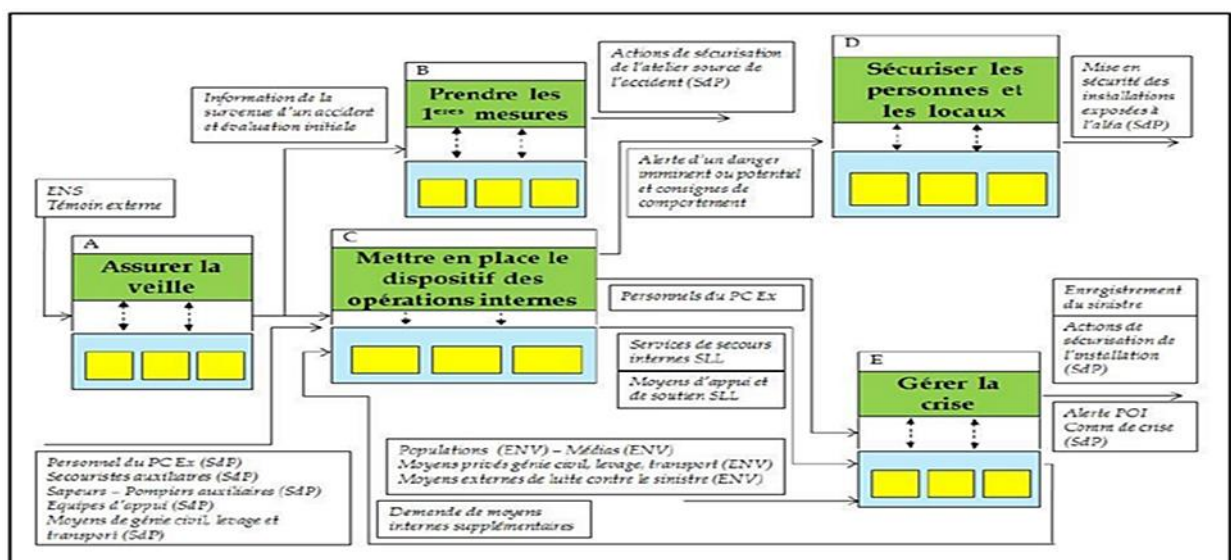


Figure 2.6 : Modèle structuro-fonctionnel d'un Plan d'Opération Interne (POI) [56]

Chaque type de ressources possède un groupe d'attributs (y compris des arbres de défaillance) qui facilitent le calcul de la probabilité de leur défaillance. Le calcul de la probabilité de défaillance des fonctions du modèle se base sur les probabilités de défaillances des ressources associées, en s'appuyant sur l'arbre de défaillances propre à chaque fonction. L'estimation de la gravité de défaillance de chaque fonction se fait en fonction des conséquences les plus graves de cette défaillance sur le système et son environnement. L'importance critique de chaque fonction est déterminée en combinant la probabilité et la gravité de son dysfonctionnement. La solidité du PII est mesurée à travers la gravité des pannes potentielles, basée sur la compilation des niveaux de criticité de ses fonctions. Toutefois, la consolidation des niveaux de criticité des fonctions ne prend pas en compte l'importance relative de différentes fonctions du plan et la performance est évaluée qualitativement d'où l'importance d'évaluer les PII quantitativement.

2.5. Méthodologie de modélisation itérative des plans d'urgence industriels et de leurs défaillances

2.5.1. Robustesse des plans d'urgence industriels

Il n'existe pas de définition universellement reconnue de la robustesse, et la compréhension de ce terme est encore compliquée par sa relation avec la résilience et la stabilité. La robustesse est intuitivement définie comme la capacité d'un système à adapter son comportement à des situations imprévues, comme une perturbation de l'environnement, ou à des dysfonctionnements internes dans l'organisation du système [57]. Cependant, cette définition ne différencie pas clairement les notions de robustesse ou de résilience. Selon Harding et al. [58], la résilience représente la capacité d'un environnement physique ou biologique, d'une société, d'une organisation ou d'une personne à vivre une expérience stressante, tout en minimisant son impact ou en utilisant l'adversité pour améliorer son organisation de développement. Par ailleurs, dans le contexte de la gestion des urgences et des crises, la résilience est définie comme la capacité de l'organisation (à tout niveau) à continuer d'accomplir ses tâches en adaptant son fonctionnement aux situations dangereuses, à l'incertitude, à la pression du temps et aux menaces. La robustesse, quant à elle, est définie comme la capacité de l'organisation à survivre et à rester sous contrôle face à l'émergence de nouveaux modèles organisationnels [59].

En ce qui concerne le mécanisme de réponse aux accidents industriels, tels que ceux établis par le biais de plans d'urgence industriels internes et externes dans le cadre de la directive Seveso, la robustesse peut être définie en termes de capacité du système de répondre à l'urgence pour maintenir un niveau efficace de réponse opérationnelle à l'urgence (c'est-à-dire survivre et rester

sous le contrôle de la situation d'urgence) lorsque l'état des éléments du système se détériore ou dans des situations imprévues. De telles circonstances peuvent résulter par exemple de défaillances des ressources techniques nécessaires aux opérations d'intervention, du manque de compétence du personnel d'intervention ou de problèmes inhérents aux procédures d'urgence elles-mêmes. A titre d'exemple, la robustesse peut inclure la capacité à assurer toutes les fonctions liées aux communications d'un plan d'urgence interne en l'absence d'une partie du personnel de communication au poste de commandement ou lorsqu'une partie des contacts d'urgence de référence n'est pas accessible. En d'autres termes, on peut définir la robustesse des plans d'urgence industriels comme l'efficacité du système industriel d'intervention d'urgence ou sa capacité à fonctionner conformément au plan et à répondre aux exigences basées sur les résultats définis dans le plan dans des circonstances dégradées ou situations imprévues [60].

2.5.2. Analyse des risques basés sur un modèle fonctionnel

L'analyse a priori des plans d'urgence peut permettre d'identifier les défaillances susceptibles de survenir au sein d'un mécanisme de réponse aux accidents industriels. Cette analyse a priori est souvent réalisée à l'aide d'un modèle structuro-fonctionnel. Les plans d'urgence industriels sont souvent décrits par des organigrammes, qui ont pour objectif de faciliter la compréhension du plan [61]. Bien que cette représentation soit assez didactique et illustre la séquence des principales fonctions du plan, elle ne met pas en évidence les aspects opérationnels du mécanisme établi à travers le plan, les ressources utilisées pour remplir chaque fonction, ou les interactions entre ces fonctions et ressources. D'un autre côté, un modèle fonctionnel du plan d'urgence industriel peut illustrer les relations entre les différentes fonctions sous forme d'interactions entre elles, mais aussi l'affectation des ressources aux fonctions (c'est-à-dire ce qui est nécessaire pour réaliser chaque action). Ainsi, un modèle structuro-fonctionnel permet de mieux étudier le mécanisme de réponse d'urgence.

Un autre avantage de l'utilisation d'un modèle explicite pour décrire un plan d'urgence industriel réside dans la capacité à représenter chaque fonction comme une entité distincte. Ensuite, des ressources, des interactions (entrées, sorties et supports) et d'autres attributs sont associés à chaque entité, afin de compléter la représentation. Un « package » constitué de la fonction, de ses ressources, de ses interactions et autres des attributs sont donc créés pour chaque fonction. L'ensemble du plan peut donc être représenté comme un assemblage de ces « paquets ». Cette approche modulaire améliore la flexibilité dans la conception et l'analyse d'un plan d'urgence industriel et permet au concepteur (et/ou à l'analyste) de concentrer son attention sur des parties spécifiques du plan.

De plus, en représentant un plan d'urgence industriel par un modèle fonctionnel, on peut décomposer ce système complexe en sous-systèmes autonomes et fonctionnels indépendamment. En psychologie

cognitive, l'extériorisation et la décomposition structurelle sont considérées comme les principales stratégies de résolution de problèmes complexes et sont souvent appliquées par les analystes de différents domaines [62]. Les plans d'urgence industriels sont des systèmes du monde réel, toute tentative de les analyser doit donc prendre en compte un grand nombre de composantes, ce qui crée par conséquent un grand nombre d'interactions. Il a été souligné dans la littérature que cette complexité de modélisation peut être gérée par une stratégie de modèle hiérarchique en gestion des risques [63]. Dans une telle approche hiérarchique, des modèles progressivement plus détaillés du système peuvent être créés en appliquant une séquence de décomposition structurelle qui décompose le système en composants moins abstraits. Les composants peuvent alors être analysés séparément et les résultats intégrés à l'analyse, tout en conservant le modèle global du système étudié. Cela permet d'augmenter le niveau de profondeur de l'analyse, tout en réalisant des économies d'échelle sur le temps global d'analyse [64].

2.5.3. Retour d'expérience et analyse des plans d'urgence industrielle

Les interventions industrielles en cas d'urgence nécessitent des interventions précises et efficaces ce qui nécessite une bonne organisation. Les circonstances de la phase de réponse ne permettent pas de disposer du temps nécessaire pour improviser cette organisation, qui devrait donc être mise en place et testée avant que l'urgence ne survienne.

Les autorités nationales de gestion des situations d'urgence et/ou de protection civile de nombreux pays ou organisations spécialisées publient souvent des guides de planification d'urgence, conçus pour faciliter le travail des planificateurs d'urgence. Les exemples incluent l'agence fédérale américaine de gestion des urgences [65, 66], la direction de la protection civile du ministère français de l'intérieur [67,68], le groupe d'études sur la sécurité des industries pétrolières et chimiques en France (GESIP) [69], etc. Ces guides sont basés sur les leçons tirées des urgences et catastrophes naturelles et technologiques passées et représentent les connaissances et pratiques actuelles en matière de planification d'urgence.

Le retour d'expérience est donc une source d'information importante pour l'analyse des plans d'urgence industriels, où les enseignements tirés font souvent partie des mécanismes opérationnels. Le processus de retour d'expérience nécessite d'identifier les paramètres du plan qui ont pu ou non fonctionner à chaque fois qu'un dispositif opérationnel est activé, comme lors d'exercices ou pour répondre à des accidents réels. Alors que ces derniers constituent le seul véritable test de tout système d'intervention d'urgence, les exercices peuvent également servir à évaluer tout ou partie du mécanisme opérationnel établi dans le cadre d'un plan d'urgence. Cette évaluation peut ensuite être utilisée pour améliorer le système de réponse.

Par nature, le processus de retour d'expérience permet d'identifier les éléments efficaces des plans ainsi que les pannes ou défauts déjà survenus lors de la mise en œuvre des plans d'urgence, mais ne permet pas une analyse systémique et exhaustive des plans d'urgence étudiés [65, 66]. Ce processus peut souvent être considérablement amélioré par une méthode structurée d'analyse de la robustesse des plans d'urgence. A ce titre, plusieurs auteurs ont déjà souligné la nécessité d'une analyse systémique des plans d'urgence [70, 71, 72].

2.6. Influence des facteurs humains sur le PII

Les facteurs humains peuvent avoir une influence significative sur l'efficacité d'un PII. Ces facteurs comprennent les compétences, la formation, l'attitude et la motivation des intervenants. Le manque de l'un de ces facteurs rend les intervenants moins efficaces dans la gestion d'une situation d'urgence.

2.6.1. Compétences

Les intervenants doivent avoir les compétences et les connaissances nécessaires pour gérer efficacement une situation d'urgence. Ces compétences comprennent la connaissance des protocoles d'intervention, la capacité à évaluer rapidement la situation et à prendre des décisions appropriées, et la capacité à communiquer efficacement avec les autres intervenants et les victimes.

2.6.2. Formation

Une formation régulière et adéquate est essentielle pour que les intervenants puissent maintenir leurs compétences et leurs connaissances à jour. La formation doit couvrir les aspects théoriques et pratiques de l'intervention, ainsi que les dernières techniques et technologies.

2.6.3. Attitude

L'attitude des intervenants est également importante. Les intervenants doivent être calmes, professionnels et efficaces sous pression. Ils doivent également être capables de faire preuve d'empathie et de compassion envers les victimes.

2.6.4. Motivation

La motivation des intervenants est essentielle pour leur engagement et leur efficacité. Les intervenants doivent être motivés par un désir d'aider les autres et de faire une différence dans le monde [71].

2.7. Conclusion

Nous avons consacré ce chapitre à la description du PII qui est un outil indispensable pour la sécurité des personnes, des biens et de l'environnement. Il doit être élaboré et mis en œuvre avec soin, en collaboration avec les services de secours extérieurs. Dans le prochain chapitre, nous allons présenter et appliquer les méthodes IDEF0 et BPMN afin de pouvoir modéliser le fonctionnement d'un PII en termes de ses différentes composantes et de son déroulement. De plus, la méthode BPMN va nous permettre de réaliser certaines évaluations quantitatives de la performance du PII.

Chapitre 3 :

Modélisation

Fonctionnelle Des PII à

l'aide des approches

IDEF0 et BPMN

3.1. Introduction

L'exigence d'une réponse rapide des entreprises lors de crises majeures a engendré le besoin de développer des méthodologies de modélisation pour structurer et harmoniser leurs actions, ou plutôt leur processus, afin de traiter les situations d'urgence dans les meilleurs délais. Un processus d'affaires implique une série d'étapes visant à réaliser un objectif spécifique. Comment peut-on représenter tout cela de manière schématique ?

Aujourd'hui, il existe de multiples façons pour modéliser et représenter un processus d'entreprise. Chacune dispose de son vocabulaire distinct (les composants graphiques ou les primitives d'un langage de bas niveau) ainsi que de sa propre grammaire (la sémantique de l'assemblage). Il devient donc compliqué pour ceux qui ne sont pas familiarisés de manipuler des modèles dans divers langages. C'est la raison pour laquelle il est fortement conseillé d'avoir une norme pour la représentation des processus d'affaires, tant au niveau schématique qu'au niveau de l'exécution. Dans cette optique, l'objectif de ce chapitre est d'abord de présenter deux langages de modélisation des processus les plus couramment utilisées, à savoir : IDEF0 et BPMN. Ensuite, nous les illustrons sur un PII spécifique.

3.2. Description de l'approche IDEF0

L'IDEF0 est une méthode de modélisation qui permet de décrire les fonctions d'un système et les relations entre ces fonctions. Elle est basée sur le principe de la décomposition fonctionnelle, qui consiste à diviser le système en fonctions plus petites et plus simples.

3.2.1. Concepts fondamentaux

Le modèle IDEF0 est basé sur sept concepts fondamentaux [73] :

- **Modéliser pour comprendre** : IDEF0 est utilisé pour résoudre un problème en élaborant un modèle ou une illustration qui témoigne d'une connaissance approfondie de ce qu'est le problème. Il est souvent souhaitable d'examiner un problème sous différents angles.
- **Décomposition descendante** : IDEF0 décompose un sujet complexe en plusieurs parties. La méthode d'analyse d'un problème s'effectue de manière descendante, modulaire, hiérarchique et organisée (voir figure 3.1). IDEF0 commence par la représentation la plus globale ou abstraite du système qui est illustrée par une boîte. Il est donc possible de commencer à diviser cette boîte en plusieurs sous-boîtes plus détaillées, chacune symbolisant une fonction principale de la première boîte. Un module sera segmenté en au moins trois, mais pas plus de six sous-modules.

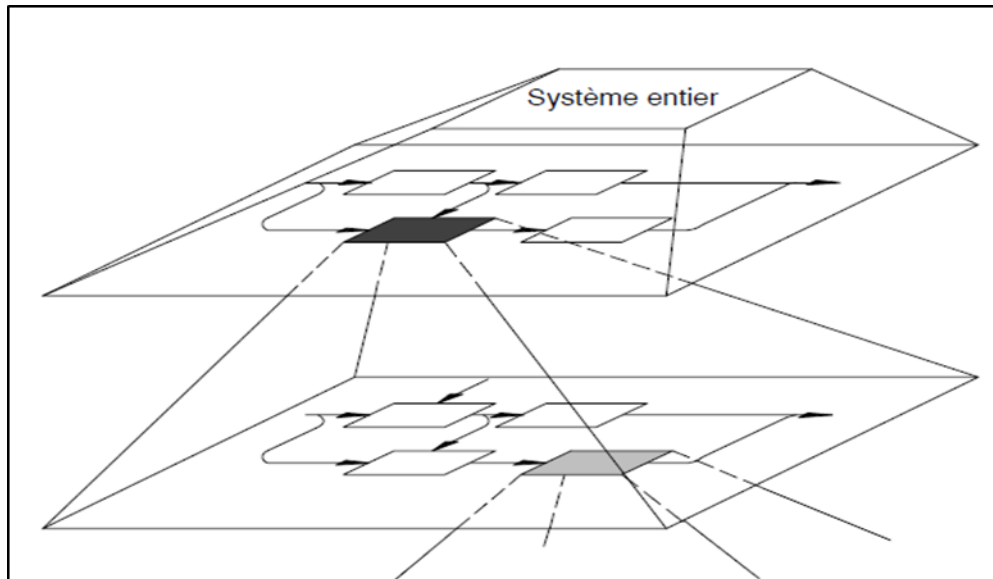


Figure 3.1 : Décomposition structurée [73].

Les liens entre les différents modules sont illustrés à l'aide de flèches. Un module peut être subdivisé en sous-modules. On se sert des notions de parent et d'enfant pour définir les relations entre un module (module parent) et le diagramme (diagramme enfant) représentant les sous-modules dans lesquelles le module est divisé (figure 3.2).

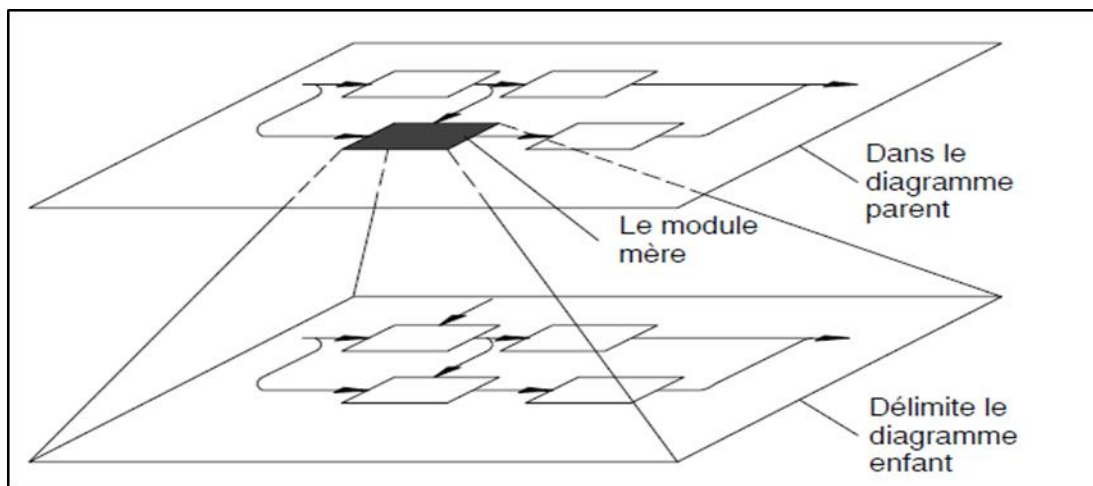


Figure 3.2 : Relation entre parent et enfant [73].

- **Séparation du quoi du comment** : IDEF0 sépare la création d'un modèle fonctionnel qui indique les fonctions que le modèle doit remplir (phase d'analyse) et la création d'un modèle de conception (phase de conception) qui détaille comment le système est conçu pour accomplir ces fonctions. Durant la phase de conception, on détermine les mécanismes susceptibles d'être exploités pour accomplir les fonctions demandées.

- **Modélisation des événements** : IDEF0 modélise les événements, c'est-à-dire, les actions réalisées par des personnes, des machines, des ordinateurs, etc.
- **Représentation graphique** : elle illustre les divers éléments des composants, les liens qui les unissent et leur intégration dans une structure hiérarchique.
- **Outil de travail de groupe** : IDEF0 encourage le travail collaboratif. Il est généralement impossible qu'une seule personne puisse comprendre tous les éléments d'un système complexe dans le temps imparti. L'analyse et la conception requièrent une équipe coordonnée et disciplinée.
- **Mise sous forme écrite de toutes décisions et commentaires** : IDEF0 requiert que les observations, sélections et résolutions prises lors de l'analyse et de la conception soient consignées par écrit.

3.2.2. Langage graphique IDEF0

3.3.1.1. Ensemble boîte-flèche

Les diagrammes contiennent des boîtes et des flèches [74]. Les activités sont illustrées par des rectangles, qui sont identifiés par des verbes, tandis que les interfaces ou restrictions entre ces activités sont indiquées par des flèches portant des noms. Les diagrammes obtenus sont appelés actigrammes. Chaque face de la boîte porte une signification spécifique comme illustré à la (figure 3.3).

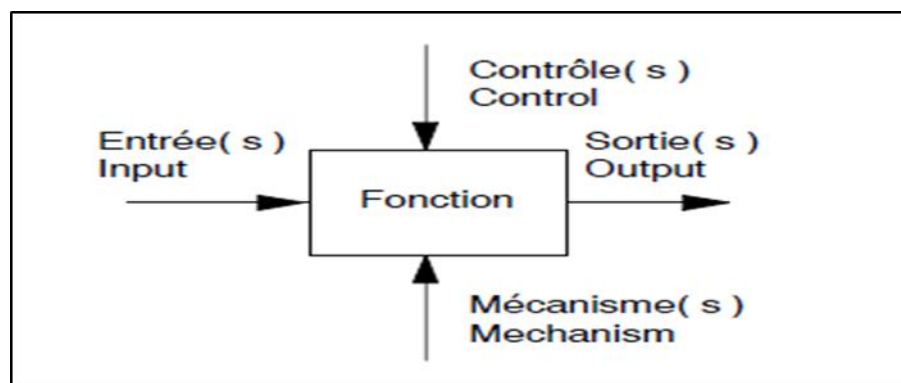


Figure 3.3 : Représentation de l'ensemble boîte-flèche [75]

Les « entrées » représentent les données utilisées ou transformées par la fonction (activité) afin de générer des « sorties ». Les données de « contrôle » reflètent les conditions et/ou les circonstances qui dirigent, guident ou limitent l'activité. Les « mécanismes » se réfèrent à l'individu, la ressource ou tout autre composant qui supporte ou réalise la fonction. Les flèches d'entrée, de contrôle et de

sortie sont désignées comme des flèches d'interface. Les flèches de mécanismes sont désignées comme des flèches de support. Toutes les conventions doivent être suivies sur chaque diagramme IDEF0. èches de *support*. Ces conventions doivent être respectées sur tous les diagrammes IDEF0. Par exemple, une flèche ne quitte jamais la face de gauche de la boîte. En résumé :

- Les entrées sont les données transformées par l'activité en sorties,
- Les sorties sont les données créées par l'activité,
- Les contrôles sont les données dont l'utilisation influe sur le processus de conversion des entrées en sorties,
- Les mécanismes sont les processeurs qui effectuent l'activité.

3.3.1.2. Connexions entre les boîtes

Pour former un diagramme IDEF0 complet, on dessine de *trois à six boîtes* sur un diagramme. Les titres des boîtes reflètent une subdivision soigneusement sélectionnée d'une unique boîte du diagramme maître et traitent manifestement le même sujet, mais de façon plus précise. Les flèches d'entrée, de sortie et de contrôle sont ensuite connectées pour montrer les interfaces entre les boîtes [73].

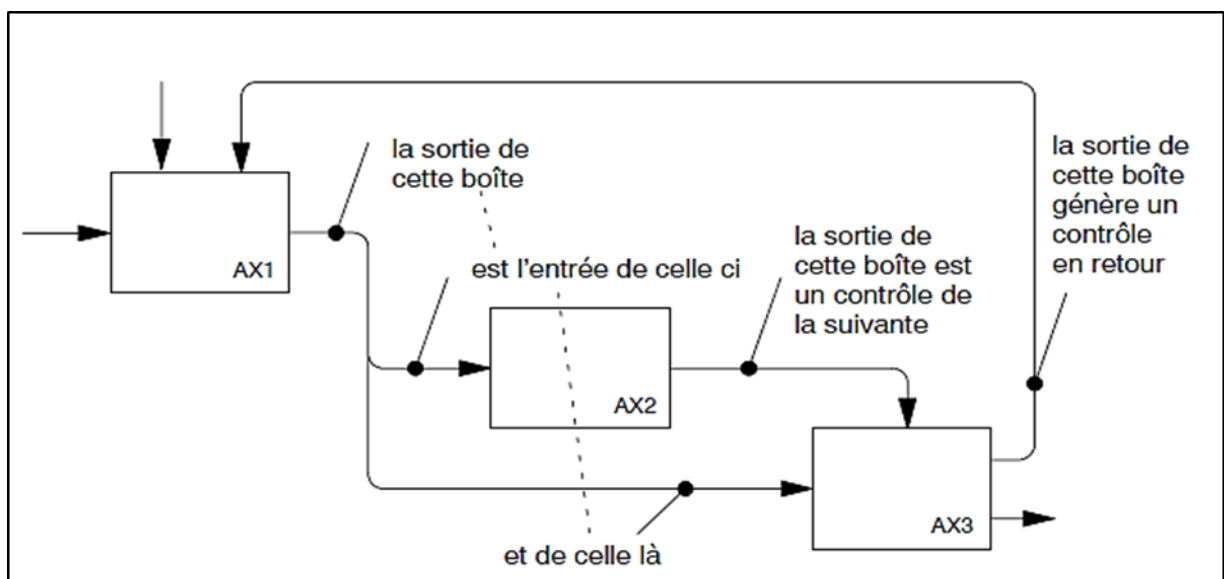


Figure 3.4 : Interfaces entre plusieurs boîtes

3.3. Diagramme BPMN

L'approche BPMN (*Business Process Model and Notation : norme de modélisation des processus métier*) est une norme gérée par un l'organisme international OMG (*Object Management Group*). Sa création remonte à 2004, et la version actuelle est la BPMN 2.0 depuis 2013. La norme BPMN 2.0 est devenue un standard incontournable pour la modélisation des processus métier et constitue

la norme internationale ISO/CEI 195103 [76], permettant de définir une notation graphique commune à tous les outils de modélisation.

Un BPMN illustre les différentes étapes d'un processus et leur ordre à l'aide d'une série de nœuds (*objets de flux*) reliés par un ensemble d'arcs (*objets de relation*), et rassemblés dans des *groupements (pools)* selon leur appartenance à un tel ou tel participant [77, 78]. Nous présentons dans ce qui suit les composants d'un diagramme BPMN.

3.3.1. Objets de flux

Ce sont les objets élémentaires composant le flux d'un processus : événements, activités et portes.

3.3.1.1. Evénements

Dotés d'une forme circulaire, les événements réagissent à des situations spécifiques pour influencer le déroulement du processus, en fonction des propriétés qui leur sont attribuées. Leurs réactions peuvent être séparées en deux catégories : *Déclenchement (Trigger)* et *Résultat (Result)* [77]. De plus, Les événements peuvent être de trois types différents : *Début (Start)*, *Intermédiaire (Intermediate)* et *Fin (End)*. L'événement *Début* est représenté par un cercle fin, il indique le point de départ. L'événement *Intermédiaire* est représenté par un double cercle et peut être utilisé de deux façons : au milieu d'un flux ou rattaché à une tâche. Celui de *Fin* est représenté par un cercle épais et marque la fin d'un processus (voir figure 3.5).

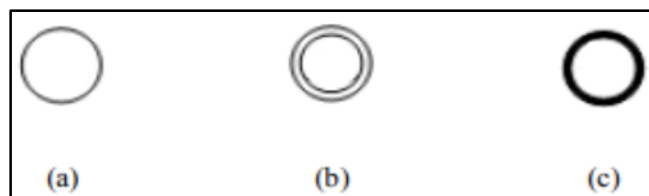


Figure 3.5 : Types des événements : (a) Début (b) Intermédiaire (c) Fin [79].

Il existe des règles d'utilisation auxquelles les événements doivent se conformer. Les règles essentielles à suivre dans un diagramme BPMN sont :

- Le diagramme peut contenir de « 0 » à « n » événements *Début* et événements *Fin*.
- S'il contient au moins un événement *Début*, il doit contenir au moins un événement *Fin*.
- S'il contient au moins un événement *Fin*, il doit contenir au moins un événement *Début*.
- S'il ne contient pas d'événements *Début*, alors, les objets de flux ne possédants pas d'arcs entrants constituent le début du processus et doivent démarrer en parallèle.

- S'il ne contient pas d'événements *Fin*, alors, les objets de flux ne possédants pas d'arcs sortants constituent la fin du processus. Ce dernier s'achèvera une fois tous ses sommets sont atteints.

La figure 3.6 montre les attributs des événements. Ces attributs s'ajoutent à ceux partagés par la catégorie objet de flux.

Event Type : (attribut commun)	type d'événement (Début, Intermédiaire ou Fin).
Trigger : (attribut du Début)	déclencheur (Message, Time, etc.).
Trigger : (attribut d'intermédiaire)	déclencheur (Message, Time, etc.)
Result : (attribut de Fin)	résultat (Message, Erreur, etc.).

Figure 3.6 : Attributs des événements

Les catégories Déclenchement et Résultat peuvent être influencées par 10 causes différentes, chacune étant représentée par une icône intégrée au motif de l'événement. La figure 3.7 donne un aperçu sur chaque cause [79].

3.3.1.2. Activités

Afin de réaliser l'objectif pour lequel le processus d'entreprise est lancé, des *activités* sont menées par des individus ou des applications logicielles. Un BPMN fournit des informations tant sur les activités manuelles que sur les activités automatisées. Les activités peuvent être des *Processus* (*Process*), des *Sous-Processus* (*Sub-Process*) ou des *Tâches* (*Task*). Ce dernier type est atomique et ne contient pas de détail interne (autres tâches) contrairement aux deux premiers qui établissent des abstractions et offrent la possibilité de sélectionner la granularité de l'information à illustrer. Les *Processus* n'ont pas de symbole spécifique, ils constituent une portion du BPMN délimitée par un ou plusieurs regroupements. Les *Sous-Processus* et les *Tâches* apparaissent sous la forme d'un rectangle aux bords arrondis. Le rectangle avec un symbole « + » en bas centre est un *Sous-Processus* masquant son détail interne (voir la figure 3.8) [79].

Dans une activité on retrouve jusqu'à 5 symboles indiquant son comportement :

- Symbole du *Sous-Processus* (celui avec le signe « + »),
- Symbole de *Boucle* (*Loop*),
- Symbole d'*Instance Multiple* (*Multiple-Instance*) qui affirme la possibilité d'exécuter l'activité plusieurs fois en parallèle,
- Symbole d'exécution libre (*Ad Hoc*) permettant une exécution avec un ordre aléatoire,

- Symbole de compensation, qui se traduit par l'exécution de son activité (reliée à un événement de *Compensation*) en cas d'interruption du *Sous-Processus* auquel l'évènement de *Compensation* est rattaché (voir la figure 3.9).

Cause	Déclenche ment	résultat	symboles		
			Attente		Lancement
			Début	Inte rmédiaire	Fin
AUCUN	Aucune indication sur le type (qui existe) n'est affichée.				
MESSAGE					
	Message reçus de la part d'un participant	Envoie de message à l'un des participants			
TIMER					
	Un moment est déterminé (date, heure, etc.)				
ERREUR					
	Une erreur s'est produite dans l'activité (avec laquelle il doit être attaché)	Envoie d'un rapport d'erreur à un événement intermédiaire			
ANNULATION					
	Une annulation au niveau de l'activité (de type transaction) (avec laquelle il doit être attaché)	Annulation d'une activité de type transaction			
COMPENSATION					
	Une compensation nécessaire de l'activité (avec laquelle il doit être attaché)	Demande de compensation			
CONDITIONNEL					
	Une condition doit être vérifié (ex : Age > 5 ans).				
LIEN					
	Destination d'un lien source	Lien source			
SIGNAL					
	Recevoir un signal émit d'un participant	Signal émit			
FIN					
	Arrêt immédiat de toutes les activités du processus				
MULTIPLE					
	Plusieurs causes sont possible (une seule cause suffi)	Plusieurs résultats sont attendus (ex : deux messages envoyés)			

Figure 3.7 : Aperçu sur les causes du déclenchement et du résultat

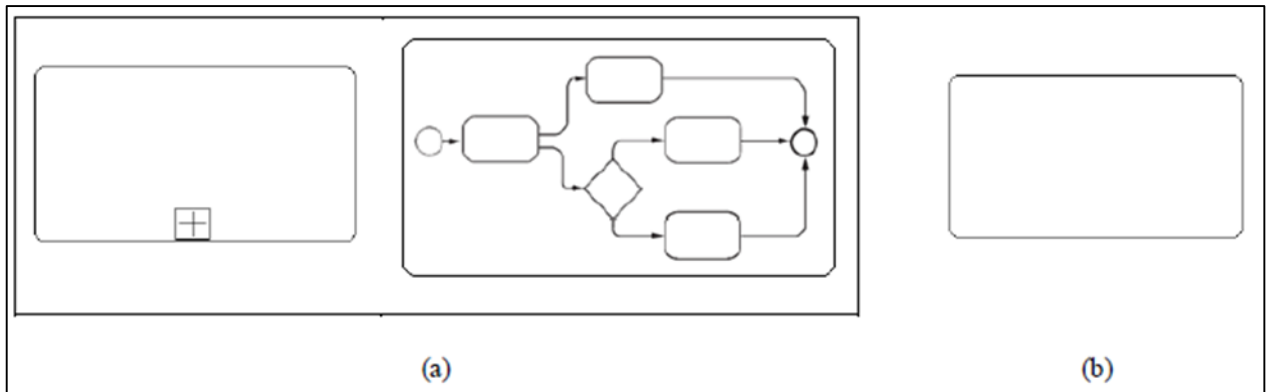


Figure 3.8 : (a) Sous-Processus (b) Tâche

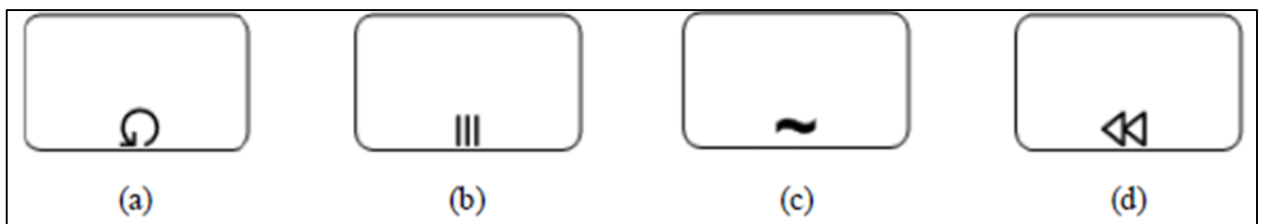


Figure 3.9 : (a) Boucle (b) Instance Multiple (c) Exécutions libre (Ad Hoc) (d) Compensation

Il est possible de combiner les symboles dans une même activité si les règles ci-dessous sont respectées :

- Une activité peut contenir de 0 à 3 symboles,
- Une activité ne peut pas contenir conjointement les symboles *Boucle* et *Instance Multiple*,
- Une tâche ne peut comporter le symbole *Ad Hoc*.

3.3.1.3. Portes

Dans un processus, il est courant que le flux qui y circule soit confronté à des intersections où plusieurs routes sont envisageables. Selon leur configuration, les carrefours orientent les flux qu'ils accueillent en fonction d'une stratégie préétablie. Dans BPMN, c'est le mécanisme de Portes (*Gateway*) qui garantit cette fonctionnalité.

Les portes sont illustrées par un diamant à l'intérieur duquel des symboles peuvent être intégrés librement (similairement aux événements et aux activités), afin de dépendre son comportement. Il y a cinq sortes de portes (référez-vous à la figure 3.10).







Portes	Description	présentation	
« Ou Exclusive » (XOR)	basé données (Data-Based)	Une seule option est choisie en fonction de la condition liée aux arcs sortants. Une option supplémentaire pour garantir le passage du flux (option par défaut) peut être ajoutée. S'il existe plusieurs arcs entrants alors le gateway fait passer les flux (un par un) sans condition particulière.	 ou 
	basé événements (Event-Based)	Une seule option est choisie en fonction du changement d'état des objets (événement Début, événement End ou activité de type 'Réception' (receive)) qui se trouvent à l'arriver des arcs sortants. S'il existe plusieurs arcs entrants alors le gateway se comporte comme le précédent.	
« Ou inclusif » (OR)	Contrairement au XOR, le « ou inclusive » n'exclut pas la possibilité d'emprunté plus d'un chemin. Une option par défaut est utile pour garantir le passage du flux.		
« Parallèle » (Parallel)	Toutes les options sont choisies à l'arriver du flux.		
« Complexe » (Complex)	Si les gateways précédents ne suffisent pas, le modelleur peut avoir recours à ce dernier.		

Figure 3.10 : Types de portes [79].

3.3.2. Objets de relation

Les objets de relation font la liaison entre les objets du diagramme. Ils sont au nombre de trois :

3.3.2.1. Flux de séquences

La catégorie Flux de séquences établit un lien entre une activité et une autre, une activité et un événement ou encore une activité et une condition de branchement (Gateway). L'objectif de l'utilisation des flux de séquences est de planifier l'exécution des activités du diagramme. Ils illustrent les liaisons au sein d'un Groupement spécifique et ne peuvent dépasser ses limites géographiques. En général, les flux de séquences sont représentés comme une flèche allant généralement de gauche à droite ou de haut en bas, partant d'une unique source pour aboutir à un unique destinataire. Les trois variantes possibles d'un flux de séquence sont illustrées à la (figure 3.11).

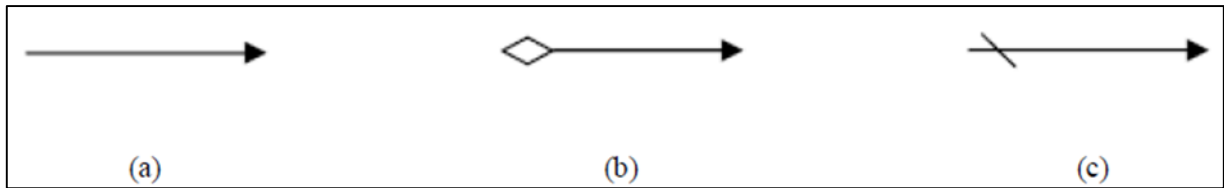


Figure 3.11 : (a) Flux de séquence de base (b) Flux de séquence conditionné (c) Flux de séquence par défaut

Le flux de séquence conditionné doit obligatoirement comporter un petit losange s'il a comme origine une activité. C'est une méthode, lorsqu'ils sont deux ou plus, de différencier le comportement conditionné du comportement parallèle. L'option par défaut de flux de séquence est une représentation spécifique qui la distingue des autres alternatives.

3.3.2.2. Flux de messages

Les flux de messages garantissent la transmission de messages d'une entité à une autre. Il leur est nécessaire de lier un *Groupement (pool)* ou un objet au sein de ce regroupement à un autre regroupement ou à un objet présent dans celui-ci. Habituellement, l'orientation qu'ils choisissent crée un angle de 90° par rapport à celle suivie par les courants de séquences, ceci pour des raisons de clarté. Une seule visualisation est envisageable pour le flux de messages (figure 3.12).

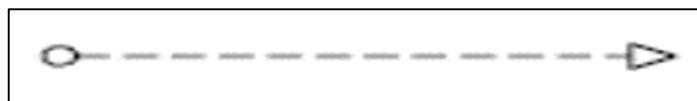


Figure 3.12 : Flux de messages

3.3.2.3. Associations

Les associations font la liaison entre deux objets. Ils associent un *objet symbolique (artefact)* à un flux ou à un objet de flux et aussi, un événement de compensation à une activité. Deux représentations graphiques existent (figure 3.13).



Figure 3.13 : (a) association non orienté (b) association orienté

3.3.3. Partitions (Swimlanes)

Il s'agit des éléments graphiques qui facilitent l'organisation et le regroupement des différents éléments constituant le diagramme BPMN. Ces éléments sont les *partitions (Pools)* et les *sous-partitions (Lanes)*.

Un *Pool* représente les principaux participants d'un processus. Un autre *Pool* peut se trouver dans une autre entreprise ou un autre service, mais toujours impliqué dans le processus. Les *Lanes* d'un *Pool* montrent les activités et le flux d'un certain rôle ou participant, définissant qui est responsable de quelles parties du processus. Elles sont utilisées pour organiser plus précisément les *Objets de flux*, les *Objets de connexion* et les *Artefacts* (figure 3.14).



Figure 3.14 : Représentation des Pools et Lanes

3.3.4. Artefacts

Les artefacts sont des outils permettant d'ajouter fournir des informations supplémentaires sur le processus. Voici les trois différents types d'artefacts (figure 3.15) :

- *Objets de données (Data object)* : qui montre quelles données sont requises pour une activité (via une association).
- *Groupes (Groups)* : qui sont utilisés pour regrouper différentes activités, afin de mieux les repérer visuellement sur le diagramme, mais n'affecte pas le flux dans le diagramme.
- *Annotations (Annotations)* : qui permettent d'ajouter des commentaires pour faciliter la lecture du diagramme BPMN.

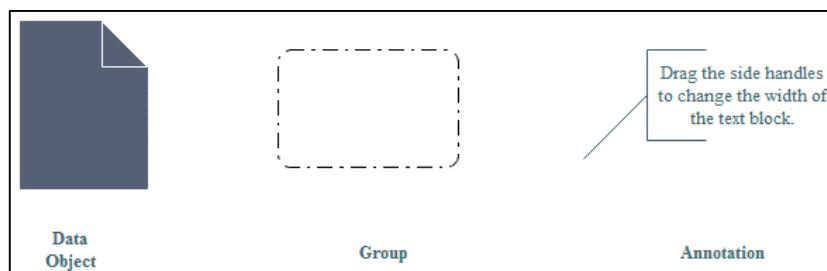


Figure 3.15 : Types d'artefacts

3.4. Modélisation du PII à l'aide de l'IDEF0 et BPMN

Dans ce qui suit, nous allons modéliser un PII relatif à un incendie produit au niveau d'une sphère de stockage de Gazoline, située au sein du complexe GNL1/k (Skikda, Algérie), en utilisant successivement les approches IDEF0 et BPMN. En effet, L'IDEF0 permet dans un premier de

comprendre les différentes étapes du PII allant du déclenchement jusqu'à la maîtrise de la situation. Ensuite, l'approche BPMN nous permet de réaliser la simulation de l'ensemble de ces étapes afin de mesurer certaines performances du PII, tel que le temps de son accomplissement.

3.4.1. Description du cas d'étude

Le Gazoline produit par le déisopentaniseur est stockée dans la sphère 76-MD03 (d'une capacité de 3000 m³) comme le montrent les figures 3.16 et 3.17 et 5, avant d'être envoyée à la raffinerie [80]. La pression de service est de 0,51 bar. La température maximale de fonctionnement est de +62°C et la température minimale de +1°C [81]. Les caractéristiques physiques du Gazoline sont données dans le tableau 1.



Figure 3.16 : Sphère de stockage de Gazoline 76-MD-03 [80]

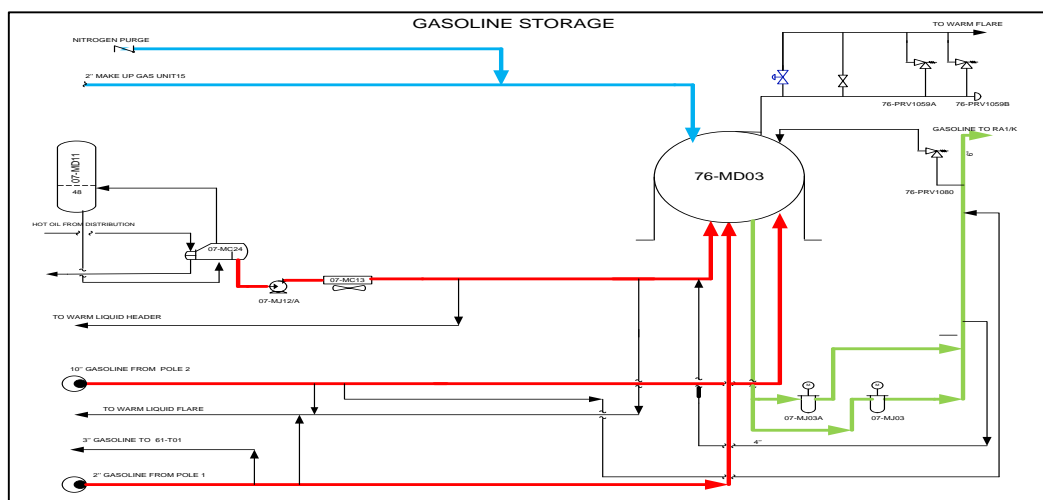


Figure 3.17 : Lignes de réception et de transfert de la sphère 76-MD-03 [80].

Tableau 3.1 : Caractéristiques physiques de la gazoline (pentane est majoritaire) [81].

produit	Densité		Point éclaire C°	Point ébullition C°	Tension vapeur à 38C° (kg/cm ²)	Point auto- inflammation C°	Limite inflammabilité %	
	Liquide à 15°c	vapeur					inférieure	supérieure
Pentane C5 ⁺	0,631	2,491	-40	36	1,1	309	1,5	7,6

Nous considérons le cas d'une fuite de gazoline au niveau de l'une de conduite qui pourrait engendrer de différents phénomènes d'accidents majeurs tels que le feu de nuage (flash fire), explosion et feux de cuvette. Les distances d'effet d'une surpression potentielle sont données à la figure 2.18 [80].



Figure 3.18 : Distances d'effets liées à la surpression (sphère 76-MD-03) [81].

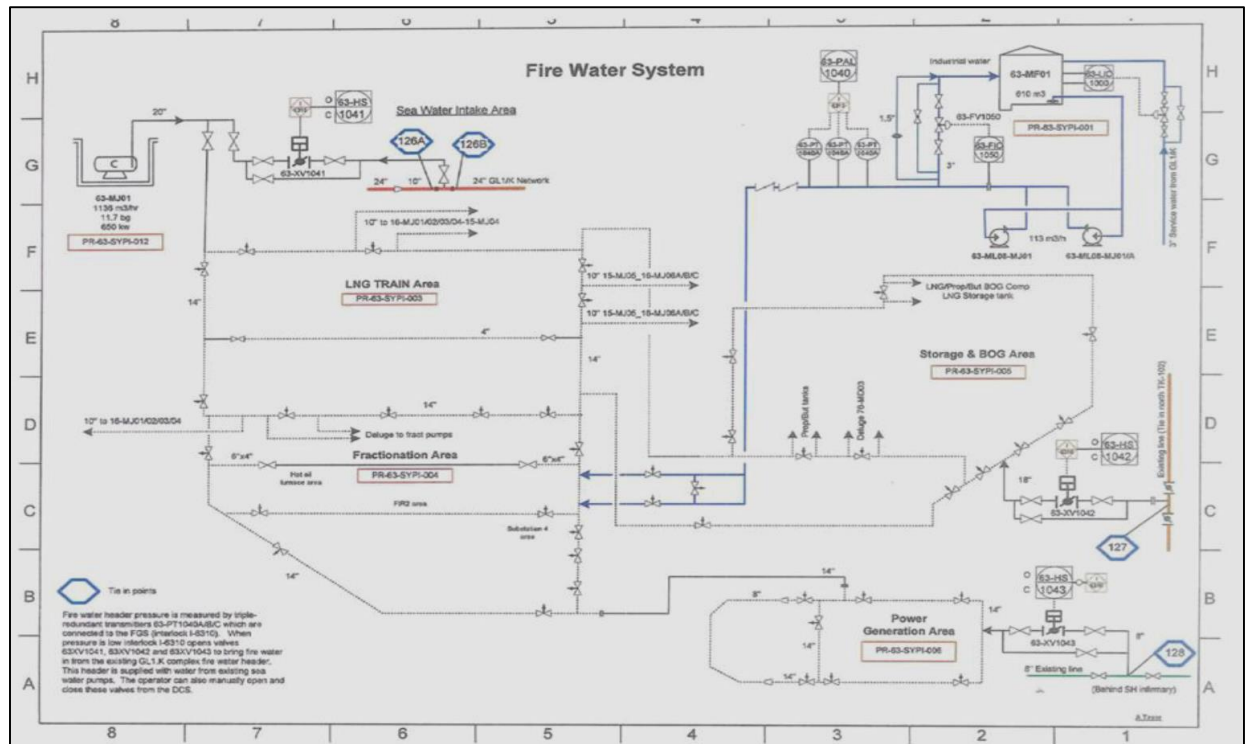


Figure 3.19 : Réseau anti incendie [81].

Les différentes étapes du PII correspondant sont résumées ci-après.

- **Alerte :**
 - Détection de présence de gaz autour de la sphère Gazoline affichée sur CCR : par détecteur de gaz (alarme 20% LEL).
 - Confirmation de la fuite par caméra du système de vidéo-surveillance.
- **Rassemblement :**
 - Rassembler les personnes concernées.
 - Informer rapidement le poste de commandement tactique (PCT) (il existe une possibilité que des sites voisins soient concernés).
 - Etablir des exigences spécifiques de rassemblement.
- **Isolation du procédé :**
 - A réaliser dès la déclaration de l'alerte : arrêter toutes les entrées et sorties des équipements concernés.
- **Retrait du produit et protection du matériel :**
 - Cette étape permet de s'assurer que la fuite est atténuée et que les accumulations locales ne se sont pas dissipées.
 - Refroidir les abords des structures, cuves, zones de traitement, etc.

- Les tentatives d'humidification de la surface effectivement touchée repoussent l'eau avant qu'elle ne puisse faire effet.
- Cela dit, un réservoir affecté par une flamme sur l'une de ses surfaces peut être protégé en refroidissant les abords des parties non affectées.
- Le déploiement des ressources du côté du vent permet un accès plus proche et une exposition moindre aux effets de la chaleur ou de la fumée.
- **Evacuation du site :**
 - Maintenir les personnes à l'intérieur à l'abri de toute fuite : en hauteur, avec portes et fenêtres fermées et systèmes de ventilation éteints.
- **Retrait (fin de l'alerte) :**
 - La fuite est totalement silencieuse (reconnaissable à la réduction du bruit de la fuite).
 - Le feu est éteint et les surfaces chaudes environnantes sont complètement refroidies et les résidus ont été nettoyés et éliminés.
 - Retour à la normale.
 - Déclaration de fin d'alerte.
 - Elaboration d'un rapport détaillé au PCT et mise à jour du PII (retour d'information)

3.4.2. Modélisation du PII par l'approche IDEF0

Dans un premier temps, nous avons modélisé le PII à l'aide de l'approche IDEF0 à l'aide d'un logiciel Edraw [82], qui a permis une analyse fonctionnelle de type descendant, hiérarchique et structurée. A partir de la modélisation des événements du PII, c'est-à-dire des activités réalisées par les hommes et les machines, nous avons montré les relations qui existent entre eux et la manière dont ils s'inscrivent dans une structure hiérarchique lorsqu'il y a un événement (alerte) déclenchant le PII (voir figures 3.20-3.22).

La figure 3.20 montre une vision globale du PII (son contexte) et présente juste les entrées, les sorties, les ressources utilisées et les contraintes possibles de manière générale lorsque l'accident (ou incident) est détecté.

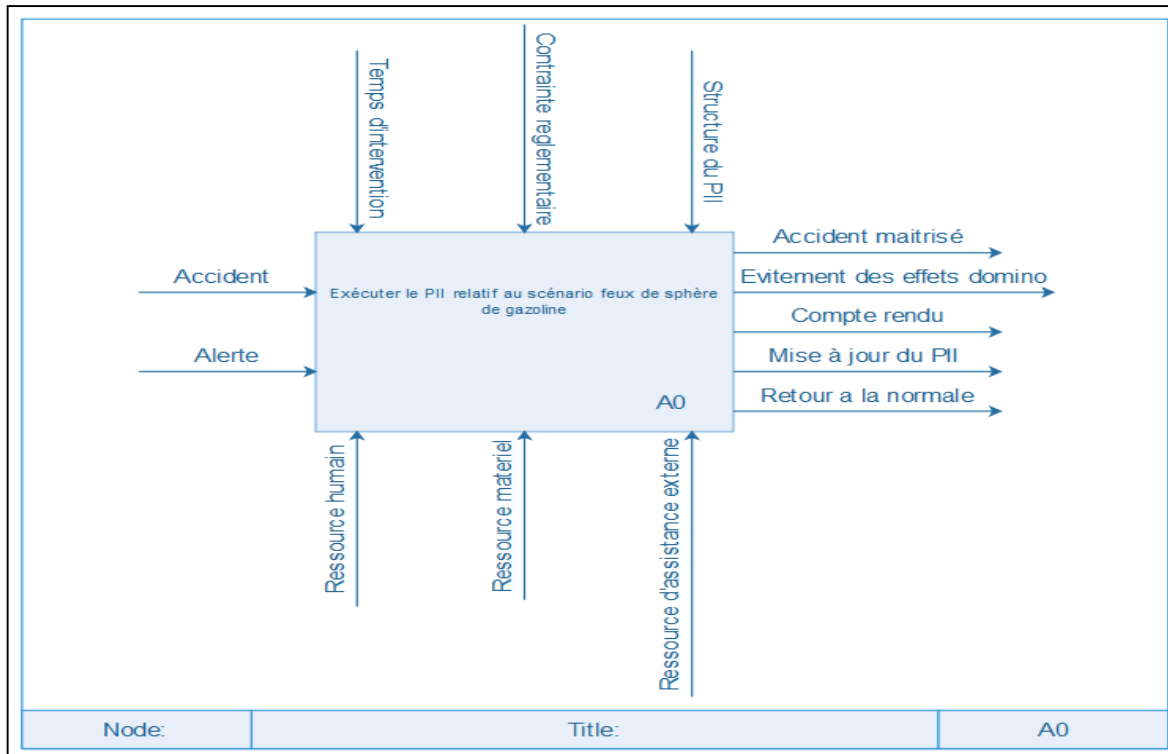


Figure 3.20 : Diagramme PII (contexte : A0)

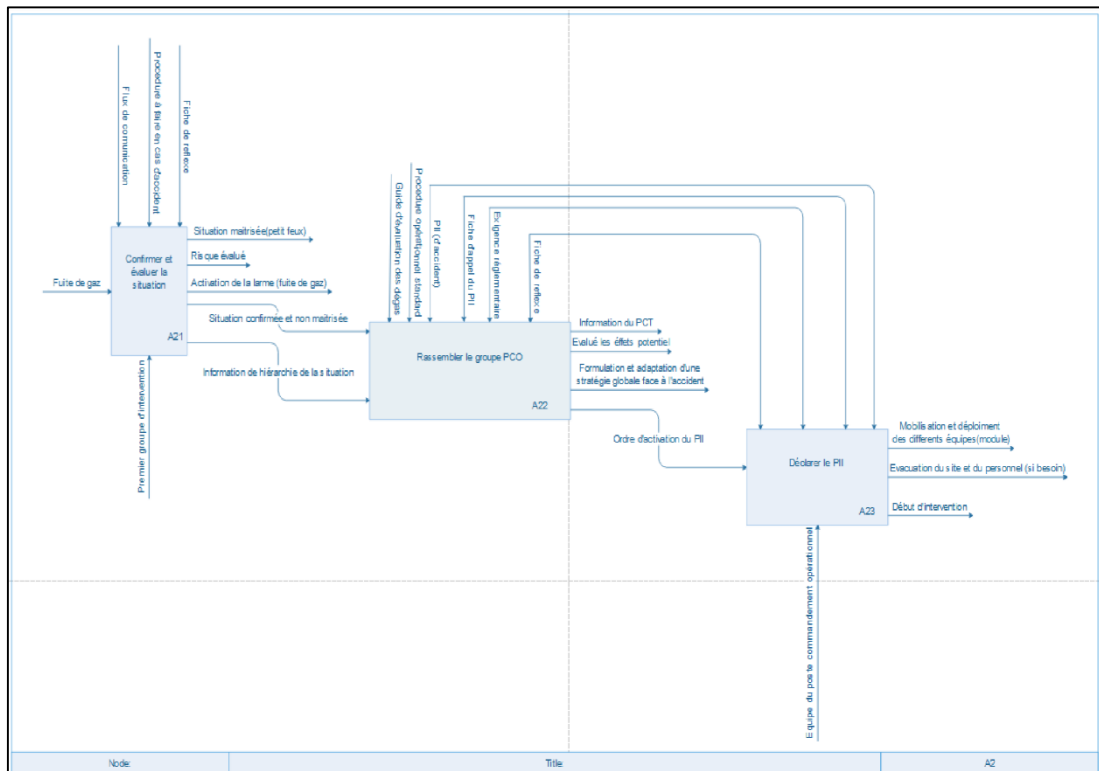


Figure 3.21 : Processus de déclenchement du PII

La figure 3.21 montre les étapes à suivre avant le déclenchement du PII suite à la confirmation de l'alerte. La figure 3.22 décrit le déroulement du PII.

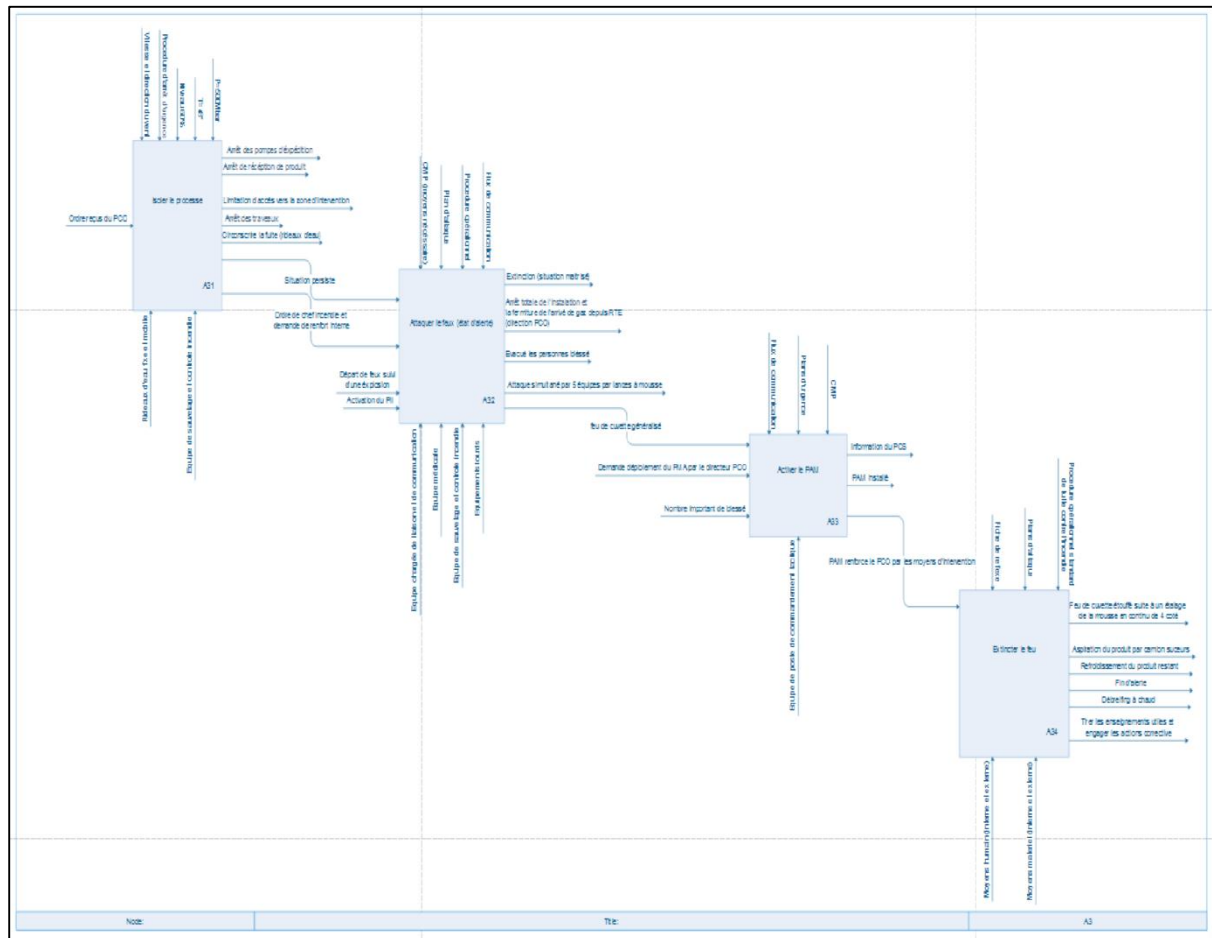


Figure 3.22 : Déroulement des interventions dans le PII

3.4.3. Modélisation du PII par l'approche BPMN

Une fois la modélisation fonctionnelle à l'aide de l'IDEF0 établie, nous avons utilisé l'approche BPMN pour obtenir une modélisation structurelle et fonctionnelle plus détaillée du PII, et surtout qui permet de réaliser la simulation du modèle résultant. A cet effet, nous avons mis à profit le logiciel Bizagi [83]. Le modèle obtenu est fourni à la figure 3.23, tandis que les résultats de simulation sont donnés au tableau 3.2 et figures 3.24 et 3.25.

Le tableau 3.2 donne tous les détails de ce plan, notamment le temps nécessaire à la réalisation des tâches/activités pour chaque étape, le type de communication entre ces activités, et les ressources humaines et matérielles nécessaires à chaque tâche/activité, en plus du temps de réalisation des situations prédéfinies.

D'après le tableau 3.2 et la figure 3.24, le temps total d'intervention jusqu'à la maîtrise du feu (extinction) suite à une fuite non contrôlée est de **65 min**. Notons que la courbe en bleu de la figure 3.24 montre l'équation linéaire qui relie le temps d'exécution de chaque tâche au temps global d'intervention.

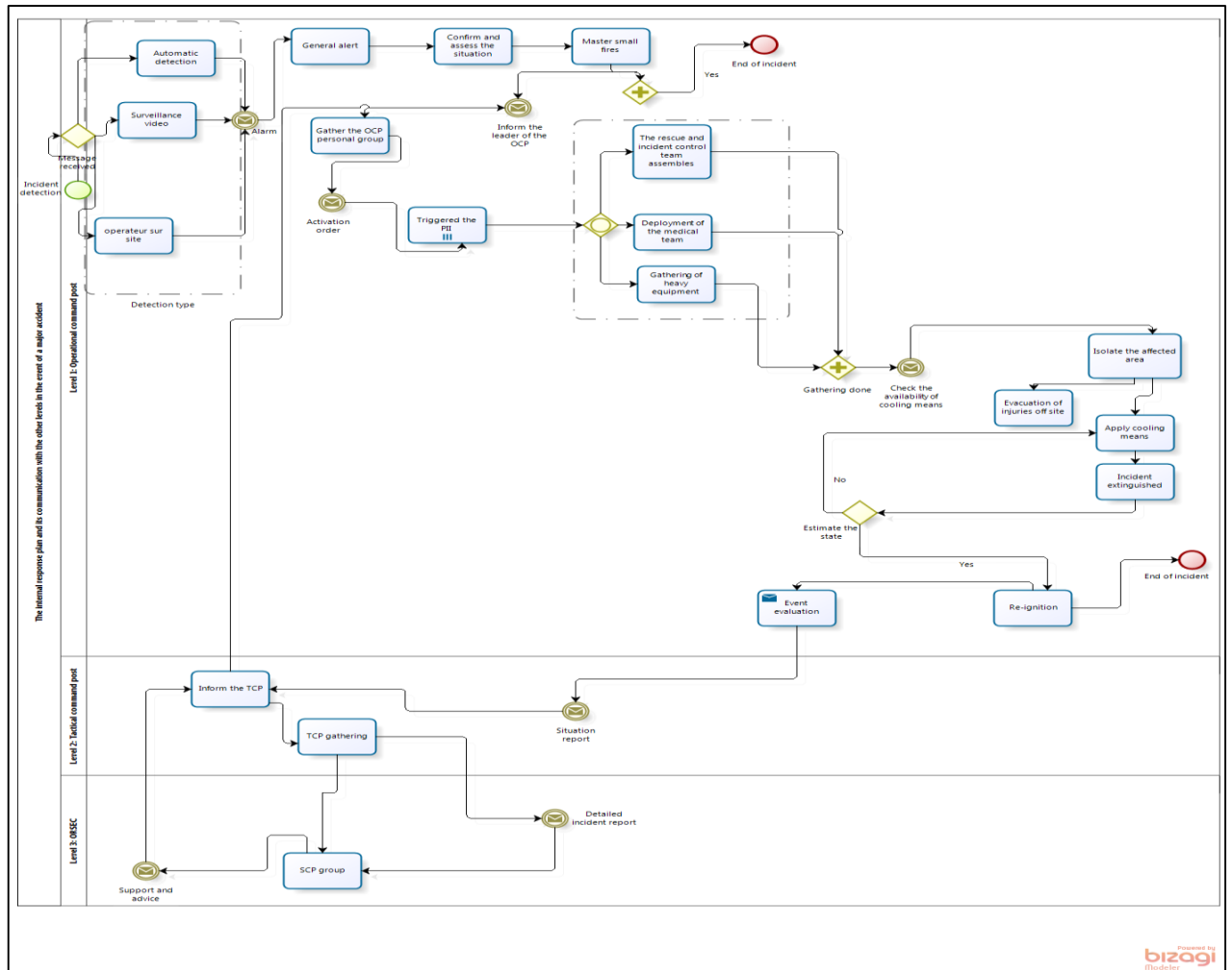


Figure 3.23 : Modélisation du PII en BPMN

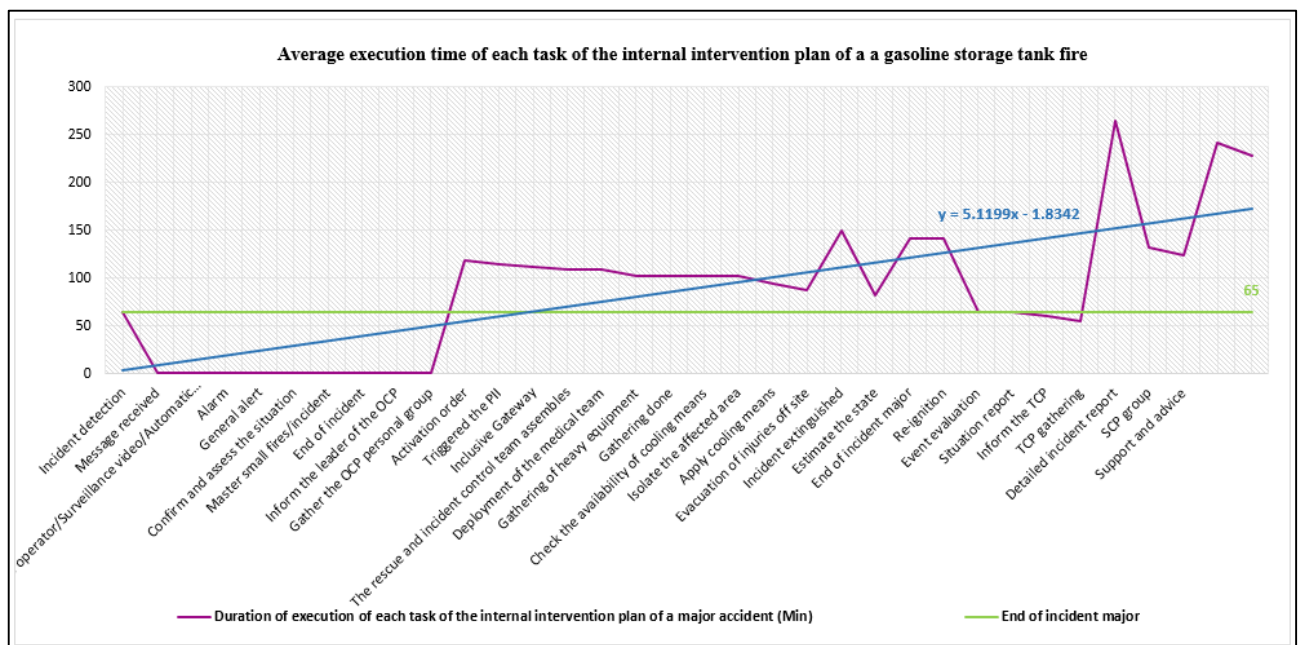


Figure 3.24 : Résultats de la simulation du modèle BPMN (temps de réalisation)

Tableau 3.2 : Récapitulatif des différents éléments du BPMN et temps d'exécution

Nom	Type	Durée d'exécution de chaque tâche (en minutes)	Ressources humaines	Ressource matérielle
plan d'intervention interne et sa communication avec les autres niveaux en cas d'incendie d'un réservoir de stockage de gazoline	Processus	65	IIP	-
Détection d'incidents	déclenchement de l'événement	1	-	Salle principale et salle de veille HSE
Message reçu	Porte (Gateway)	1	-	talky walky/ Salle principale et salle de veille HSE
Opérateur sur site/Vidéo de surveillance/Détection automatique	Tâche (Task)	1	Opérateur	vidéo de surveillance/numéro d'alerte de numérotation téléphonique
Alarme	Événement intermédiaire	1	0	Salle principale et salle de veille HSE
Alerte Générale	Tâche (Task)	1	Chef du département EHS et informé le dérogataire de l'OCP pour déclencher le PII	Les boîtiers d'alarme manuels d'incident (MAI) sont équipés d'un système à bouton-poussoir ou à tirette
Confirmer et évaluer la situation	Tâche (Task)	1	Equipe OCP	Matériel de lutte contre l'incendie avec liquide de refroidissement
Maîtriser les petits incendies/incidents	Tâche (Task)	1	Equipe OCP	Camion de pompiers (rideau d'eau appliqué)
Parallèle porte (Gateway)		1	-	-
Fin de l'incident	Fin de l'événement	1	Equipe OCP	MAI
Informé le chef de l'OCP	Événement intermédiaire	2	Equipe OCP	Matériel de lutte contre l'incendie avec liquide de refroidissement
Rassembler le groupe personnel de l'OCP	Tâche (Task)	3	Equipe OCP	Camion de pompiers (rideau d'eau appliqué)
Ordre d'activation	Événement intermédiaire	4	Chef de l'OCP	Matériel de lutte contre l'incendie avec liquide de refroidissement
Déclenchement de l'IIP	Tâche (Task)	10	Chef de l'OCP	Matériel de lutte contre l'incendie avec liquide de refroidissement
Porte (Inclusive Gateway)	Porte (Gateway)	10	-	-
L'équipe de sauvetage et de contrôle des incidents se rassemble	Tâche (Task)	13	Equipe de sauvetage et de contrôle des incidents	Camion de pompiers / camion VS (rideau d'eau appliqué)
Déploiement de l'équipe médicale	Tâche (Task)	6	Docteur et infirmière	ambulance
Rassemblement de matériel lourd	Tâche (Task)	7	Equipe d'équipement lourd	Renforcer le matériel FIR
Rassemblement terminé	Porte (Gateway)	10	-	-

Vérifier la disponibilité des moyens de refroidissement	Événement intermédiaire	9	Equipe de sauvetage et de contrôle des incidents	produit de refroidissement
Isoler la zone affectée	Tâche (Task)	8	Equipe de sauvetage et de contrôle des incidents	-
Appliquer des moyens de refroidissement	Tâche (Task)	15	Equipe de sauvetage et de contrôle des incidents	produit de refroidissement
Évacuation des blessés hors site	Tâche (Task)	8	Equipe médicale	ambulance
Incident éteint	Tâche (Task)	14	équipe d'équipement lourd	
Estimer l'état	Porte (Gateway)	14	-	-
Fin d'un incident majeur / incendie d'un réservoir de stockage d'essence	Fin de l'événement	65	Equipe OCP	MAI
Rallumage	Tâche (Task)	65	équipe d'équipement lourd	produit de refroidissement
Évaluation de l'événement	Tâche (Task)	60	Equipe de sauvetage et de contrôle des incidents	-
Rapport de situation	Événement intermédiaire	55	Coordonnateur I	E-mail ou téléphone
Informers le TCP	Tâche (Task)	26	Coordonnateur I	E-mail ou téléphone
rassemblement TCP	Tâche (Task)	33	Equipes des régions voisines	Camion de pompiers / camion
Rapport d'incident détaillé	Événement intermédiaire	32	Coordonnateur II	E-mail ou téléphone
groupe SCP	Tâche (Task)	42	Coordonnateur II	E-mail ou téléphone
Accompagnement et conseil	Événement intermédiaire	22	Protection civile et équipes des zones voisines	Camion de pompiers / camion

3.5. Conclusion

Ce chapitre était consacré d'abord à une présentation détaillée de deux approches de modélisation fonctionnelle très largement utilisées dans la modélisation des systèmes, à savoir : IDEF0 et BPMN. Nous avons vu que l'IDEF0 permet une description des différentes étapes permettant la réalisation d'un processus données d'une manière modulaire, structurée et hiérarchique. Pour chacune des activités, le formalisme IDEF0 permet de préciser les entrées, sorties, outils support et les contraintes qu'il est nécessaires de respecter. Cependant, fournie est représentation statique du processus étudié et n'autorise pas certains aspects dynamique tels que la prise en compte de la durée de réalisations des différentes tâches. Pour s'affranchir de cet inconvénient, la méthode BPMN à l'aide d'un formalisme graphique normalisé permet de rendre compte de cet aspect temporel et d'autres considérations telles que certaines relations logiques entre les entrées et sorties. Cela dit, une simulation du modèle construit peut être exécutée. Ensuite, nous avons

appliqué ces deux approches à un PII relatif à un scénario d'accident majeur au niveau d'une sphère de stockage de gazoline (complexe GNL1/K) : fuite de gazoline suivie d'explosion et de feu de cuvette. L'usage de l'IDEF0, en utilisant le logiciel Edraw, nous a permis une description fine du déroulement des différentes étapes du PII. Puis, la mise en œuvre du formalisme BPMN a conduit à une modélisation plus réaliste qui intègre les différentes relations entre les tâches et activités à réaliser et les différents acteurs concernés, d'une part, et les durées d'exécution d'autre part. La simulation du BPMN, en utilisant le logiciel Bizagi, a conduit à l'estimation du temps total d'intervention : de la détection de la fuite jusqu'à l'extinction complète du feu.

L'inconvénient majeur de l'approche BPMN, dans notre approche de modélisation des PII, est son incapacité de prendre certains aspects dynamique tels que les probabilités de défaillances des équipements d'intervention et certaines relations logiques. Pour y remédier, nous allons présenter appliquer une méthode avec un pouvoir de modélisation plus avancée : les réseaux de Petri stochastiques (RdPS).

Chapitre 4 :

*Modélisation du PII à
l'aide des Réseaux
de Petri Stochastiques
(RdPS)*

4.1. Introduction

Les réseaux de Petri (RdP) sont aujourd'hui très répandus en sûreté de fonctionnement des systèmes. Ils offrent un formalisme graphique très puissant qui permet de rendre compte des différentes relations pouvant exister au niveau du déroulement d'un PII donné. On peut facilement représenter des activités séquentielles, concurrentielles, la synchronisation, le partage de ressources et l'exclusion mutuelle (situations conflictuelles). Il convient de noter la possibilité de facilement considérer l'aspect temporel dans le modèle. Les durées d'exécution des tâches peuvent être déterministes et/ou stochastiques suivant des distributions de probabilités. Dans ce dernier cas de figure, le RdP est nommé réseaux de Petri stochastiques (RdPS).

Le reste de chapitre est organisé comme suit. Nous présentons d'abord les différents éléments constituant le formalisme graphique des RdP (structure). Ensuite, nous décrivons certains développements (évolutions et extensions) liés à ce formalisme. Puis, nous explicitons la méthode de Monte Carlo utilisée pour animer les RdP. Cette méthode permet également de prendre en compte les incertitudes des paramètres utilisés dans le RdP (par exemple, incertitudes dans les durées d'exécution des tâches ou probabilités de défaillances des équipements). Finalement, nous appliquons la démarche des RdPS au cas d'étude présenté dans le chapitre précédent, afin d'évaluer certains indicateurs de performance relatifs à son déroulement.

4.2. Introduction aux réseaux de Petri (RdP)

Les réseaux de Petri ont été développés en 1962 par Carl Adam Petri [84]. Ils sont basés sur la théorie des automates. Un RdP est une notation graphique avec une structure mathématique sous-jacente adaptée à la modélisation des systèmes à événements discrets) [85]. Plusieurs extensions des RdP ont été élaborées pour répondre aux différents besoins de modélisation des problèmes spécifiques et complexes. Les RdP permettent 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 le modèle construit à l'aide de la méthode de Monte Carlo dans le cas des RdPS [86]. Dans la suite, la présentation des RdP est volontairement limitée aux éléments nécessaires utilisés dans le cadre de ce travail doctoral. Pour plus de détail, le lecteur peut se référer à la référence [87].

4.2.1. Structure statique d'un RdP

Cette structure comporte trois objets : places, transitions et arcs (voir figure 4.1) [87].

- **Places** : représentées par des cercles ou des ovales et placées en amont ou/et en aval des transitions. Elles peuvent représenter les états des composantes du système.
- **Transitions** : dessinées sous forme de barres, elles correspondent à des événements potentiels modifiant l'état d'un RdP en cas d'occurrence (défaillances, réparations, etc.).
- **Arcs** relient des places à des transitions (*arcs amont*) et des transitions à des places (*arcs aval*). Les arcs sont pondérés avec un nombre positif (*le poids*). Ce poids indique le nombre de jetons consommés ou créés lors du *franchissement* d'une transition. Par exemple, le poids d'un arc amont peut indiquer les ressources nécessaires pour réaliser une action donnée, tandis que celui d'un arc aval peut indiquer la quantité résultant de cette action. Ce poids est pris égal à 1 s'il n'est pas mentionné sur le RdP. Notons que la possibilité d'utiliser des poids supérieurs à un est une extension intéressante des RdP (RdP généralisés).

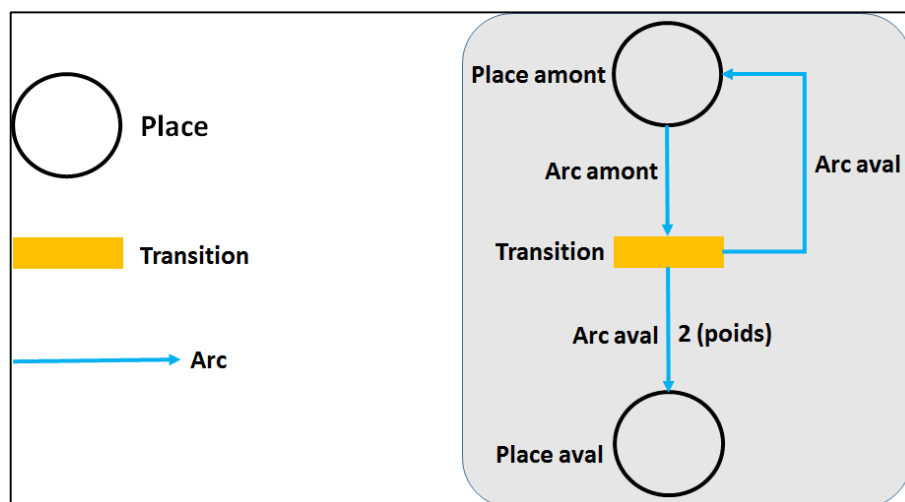


Figure 4.1 : Structure statique d'un RdP [87].

4.2.2. Structure dynamique d'un RdP

Les éléments dynamiques se superposent sur la structure statique. Ils permettent de décrire l'évolution du système modélisé. Ces éléments sont brièvement décrits dans ce qui suit (voir figure 4.2).

- **Jetons** représentés par de petits points solides. Dans les RdP basiques, les jetons sont les seuls à caractériser leur structure dynamique. Chaque place peut potentiellement contenir aucun ou un nombre positif de jetons. La distribution des jetons à certaines places est appelée *marquage* qui définit l'état du système à un moment donné. Les jetons traversent les transitions lorsque

des événements se produisent. Un jeton peut, par exemple, représenter la présence ou l'absence d'une ressource.

- **Prédicats ou gardes** : toute formule qui peut être vraie ou fausse, permettant la *validation* des transitions.
- **Assertions** : toute équation mettant à jour certaines variables lorsqu'une transition est déclenchée ou *franchie*.

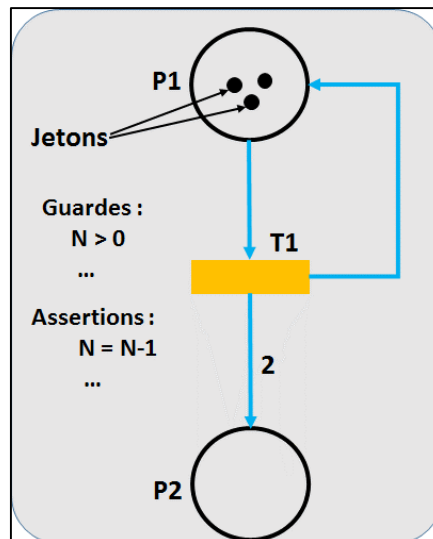


Figure 4.2 : Structure dynamique d'un RdP [87]

4.2.3. Autres extensions des RdP

L'utilisation de *ponds* des arcs supérieurs à 1, les *prédicats et assertions* constituent des extensions très pratiques des RdP basiques (ordinaires) et qui permettent la modélisation et simulation des systèmes de taille réelle. Il existe d'autres extensions dont nous résumons certaines comme suit [87]:

- **RdP à capacité limitée.** Dans un RdP standard, il n'y a pas de restriction sur la capacité des places. Ici, on attribue une capacité déterminée par un entier positif lié aux places. Donc, la traversée d'une transition dépend de la disponibilité des places en aval. Cette limitation peut illustrer la capacité d'un stock par exemple.
- **Arc inhibiteur.** C'est un arc orienté qui commence à une place P_i et se termine à une transition T_j , de sorte que la transition T_j n'est possible que si la place P_i a moins de jetons que le poids spécifié sur l'arc correspondant. Graphiquement, un arc inhibiteur est illustré par un petit cercle positionné à l'extrémité de la flèche (voir figure 4.3). L'emploi de cet arc facilite la prise en compte des propriétés d'exclusions mutuelles.

- **Arc à poids nul** : pour l'arc remettant à 0 le marquage d'une place. Un tel arc reste valide même si sa place amont ne comporte plus de jetons (voir figure 4.3). Il est donc indispensable de lui adjoindre d'autres conditions si on ne veut pas créer une boucle où la transition soit tirée indéfiniment. Ce genre d'arc de poids nul est donc très intéressant pour revenir à une situation voulue lorsque le nombre de jetons est mal connu ou ne peut pas être connu [86].
- **RdP coloré** : dans un RdP coloré, les pions sont distingués par leurs couleurs. Si le nombre de couleurs est limité, on peut réduire le problème à un RdP traditionnel. Par exemple, l'attribution de couleurs aux jetons permet de distinguer les produits qui circulent dans un processus de production.
- **Le RdP continu** : dans le cadre d'un RdP continu, l'identification des places n'est plus représentée par un nombre entier, mais par un nombre réel positif [88]. Cette forme de RdP facilite l'analyse des performances relatives au débit. Il est particulièrement bénéfique lorsque le volume de marquages dans un RdP traditionnel devient excessif ou pour illustrer des processus continus. Les systèmes de production à flux (pétrochimie, sidérurgie,...) ou à fort débit (production de masse : visserie, ...) requièrent une approche basée sur les systèmes d'information continue.
- **Le RdP hybride** : ces RdP sont utilisés pour représenter des systèmes ayant à la fois des caractéristiques discrètes et continues. Par exemple, une usine de boisson gazeuse adopte cette double stratégie : l'approvisionnement en matières premières (flux continu) et l'emballage (bouteilles, canettes).

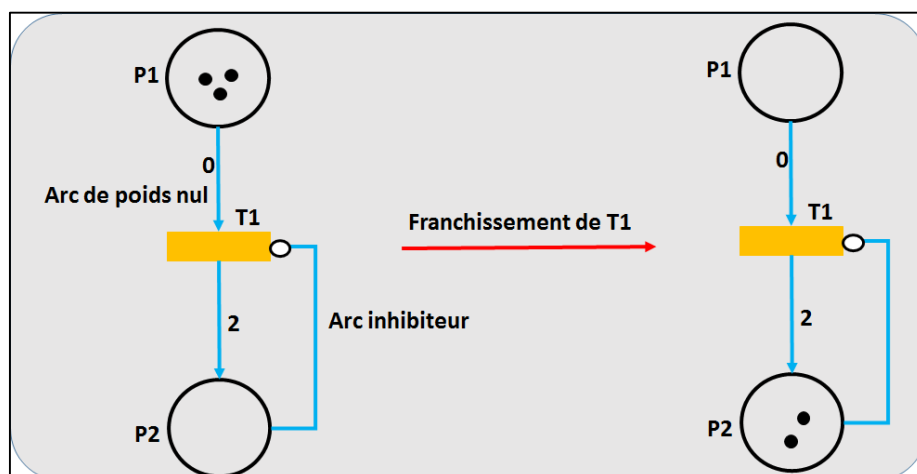


Figure 4.3 : Arc inhibiteur et arc de poids nul [88].

4.2.4. Marquage du RdP

La variation du marquage et la mise à jour de certaines informations (assertions) traduit l'évolution ou la dynamique du système modélisé au cours du temps. Dans ce qui suit, nous explicitons brièvement l'essentiel de cette dynamique [89].

- **Marquage initial** : on appelle marquage initial, noté M_0 , la distribution des jetons dans les places à l'instant initial (généralement, $t = 0$).
- **Franchissement ou tir d'une transition**. Une transition peut être franchie à partir d'un marquage M quelconque (représentant l'état du système à un instant donné) si et seulement si :
 - **Validation de la transition** : une transition est **valide** (*franchissable, sensibilisée*) lorsque toutes ses places d'entrée contiennent au moins le nombre de jetons requis par chaque arc amont (indiqué par son poids) et que tous les prédicats sont «vrais». Il convient également de considérer la particularité de l'arc inhibiteur mentionné ci-avant : la transition est valide seulement si la place amont correspondante contient un nombre de jetons inférieure au poids indiqué sur l'arc (voir figure 4.4).

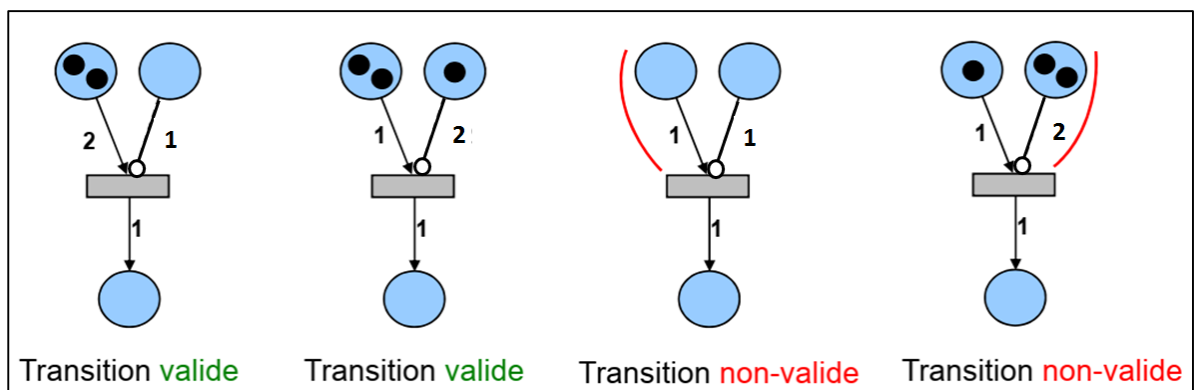


Figure 4.4 : Exemples de transitions valides ou non [89]

- **Ecoulement du délai de tir** : une transition est franchie si elle est valide et que le délai requis est écoulé, c.-à-d., durée entre la validation et le franchissement. Ce délai peut être **déterministe** (délai constant) ou **stochastique** (délai aléatoire, par exemple exponentiel négatif). Si ce délai est nul, la validation coïncide avec le franchissement. Dans le cadre de ce travail nous considérons le cas où les durées de franchissement sont affectées aux transitions (*RdP T-temporisé et stochastique*). Ces délais peuvent représenter, par exemple, le temps requis pour exécuter une tâche donnée, instants de défaillances, etc. La figure 4.5 montre un exemple d'un RdP temporisé (la règle de distribution des jetons est donnée au point suivant).

- **Distribution des jetons après le tir** : Lors du franchissement d'une transition (voir figure 4.6) [89] :

- Ses places d'entrée perdent autant de jetons que spécifiés par les poids des arcs amont respectifs. Dans le cas de poids nul, les places correspondantes perdent tous les jetons.
- Ses places de sortie gagnent autant de jetons que spécifiés par les poids des arcs aval respectifs,
- Les assertions sont mises à jour.

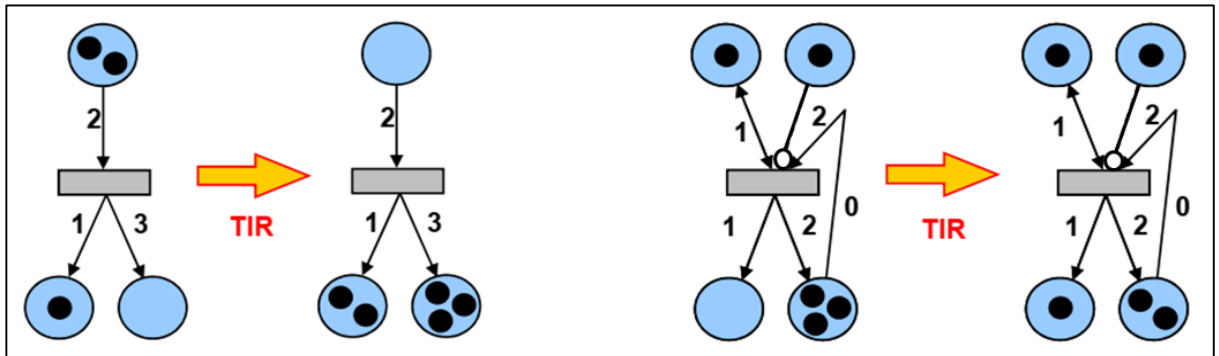


Figure 4.5 : Décalage de tir [89]

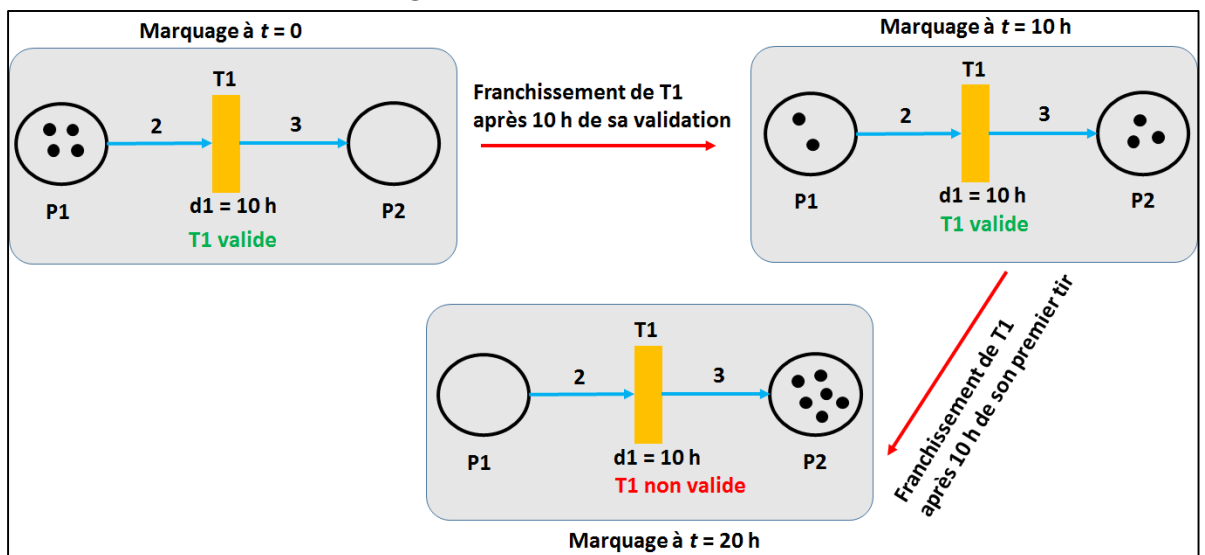


Figure 4.6 : Exemples de marquage après franchissement [89]

Remarque : dans la présentation que nous avons faite sur les RdP, nous avons délibérément évité d'introduire leur représentation mathématique rigoureuse.

4.3. Simulation de Monte Carlo

4.4.1. Introduction

Dans le cas où des durées déterministes et stochastiques sont attribuées aux transitions, les RdPS résultant ne peuvent pas être résolus facilement à l'aide d'approches analytiques, généralement par l'exploitation d'un graphe markovien équivalent obtenu à partir du RdP (graphe de marquage) [90].

Cela dit, la simulation de Monte Carlo est généralement utilisée pour s'affranchir de cette complexité. Appelé Monte-Carlo par Von Neumann en référence aux jeux de hasard, le principe de la simulation de Monte-Carlo est des plus simples : il s'agit de remplacer le calcul analytique par du calcul statistique en réalisant un grand nombre d'histoires du système étudié. Plus précisément, l'idée principale est d'utiliser des nombres aléatoires pour animer un modèle comportemental du système réel et donc de produire un large échantillon à partir duquel des statistiques sont obtenues (moyenne, variance et intervalles de confiances). Ces statistiques rendent comptes des performances recherchées du système étudié. Les différentes étapes de cette procédure sont décrites dans ce qui suit (figure 4.7).

- **Définir le contexte et les objectifs de l'étude.** Généralement, cette étape permet de bien cerner les indicateurs de performance relatifs au système modélisé que l'on cherche à mesurer : *fiabilité, disponibilité, niveau de production, niveau de stock, comparaison de configurations, durée d'intervention liée à un PII donnée, ...*
- **Recueillir et analyser les données du système :** le modèle a autant de valeur que les données utilisées. Il s'agit d'identifier les différentes activités et tâches, les éléments supports qui les réalisent, leurs caractéristiques (défaillance, réparation, temps de traitement, ressources disponibles) et les différentes interrelations et dépendances existantes. Au cours de cette étape, les différentes grandeurs participant dans la définition du système se voient attribuer des valeurs numériques déterministes (délais constants, nombre d'intervenants, taux, etc.) ou stochastiques (instants de défaillances et de réparation, probabilité de fonctionnement à la demande, taux, etc.). Les données stochastiques sont définies en termes de distributions de probabilité (exponentielle, uniforme, log-normale, normale, ...).
- **Construire le modèle comportemental :** une représentation simplifiée mais la plus fidèle du système réel ou prévu, en fonction des objectifs recherchés. Dans ce chapitre, ce rôle est joué par les RdPS, qui permettent de construire des modèles comportementaux à la fois fonctionnels et dysfonctionnels réaliste.
- **Valider le modèle construit :** déboguer le modèle établi et vérifier qu'il représente avec exactitude le système réel. Cette activité peut être réalisée à l'aide de la vérification des propriétés du modèle, la simulation pas à pas, etc.
- **Animer le modèle construit :** cette animation est mise en œuvre grâce au tirage de nombres au hasard. Il importe de signaler que la simulation de Monte Carlo requiert *un générateur aléatoire de grande qualité*. Le déroulement des histoires pour une durée d'observation donnée est effectué ainsi :

1. Générer aléatoirement une valeur pour chacun des grandeurs (selon leurs distributions).
2. Mettre les grandeurs représentant des durées (délais de tir des transitions des RdP) dans un échéancier par ordre croissant.
3. Faire évoluer le système (son marquage) en fonction de ces délais et mettre à jour l'échéancier (dates de tir des transitions) d'une manière itérative et en revenant à la première étape en cas de besoin.
4. Poursuivre la simulation (étapes précédentes) jusqu'à ce que le premier instant de l'échéancier dépasse la durée pour laquelle on désire faire les calculs. Une histoire est réalisée.
5. Répéter les étapes 1 à 4 un grand nombre de fois (par exemple, 10000) de manière à rassembler un échantillon statistiquement représentatif de ce que l'on cherche à évaluer.

- **Estimer les indicateurs de performance d'intérêt** : l'évolution du système simulée sur un grand nombre d'histoires permet d'évaluer statistiquement les informations recherchées (selon les objectifs de l'étude) : *moyenne, écart-type, intervalle de confiance, etc.*

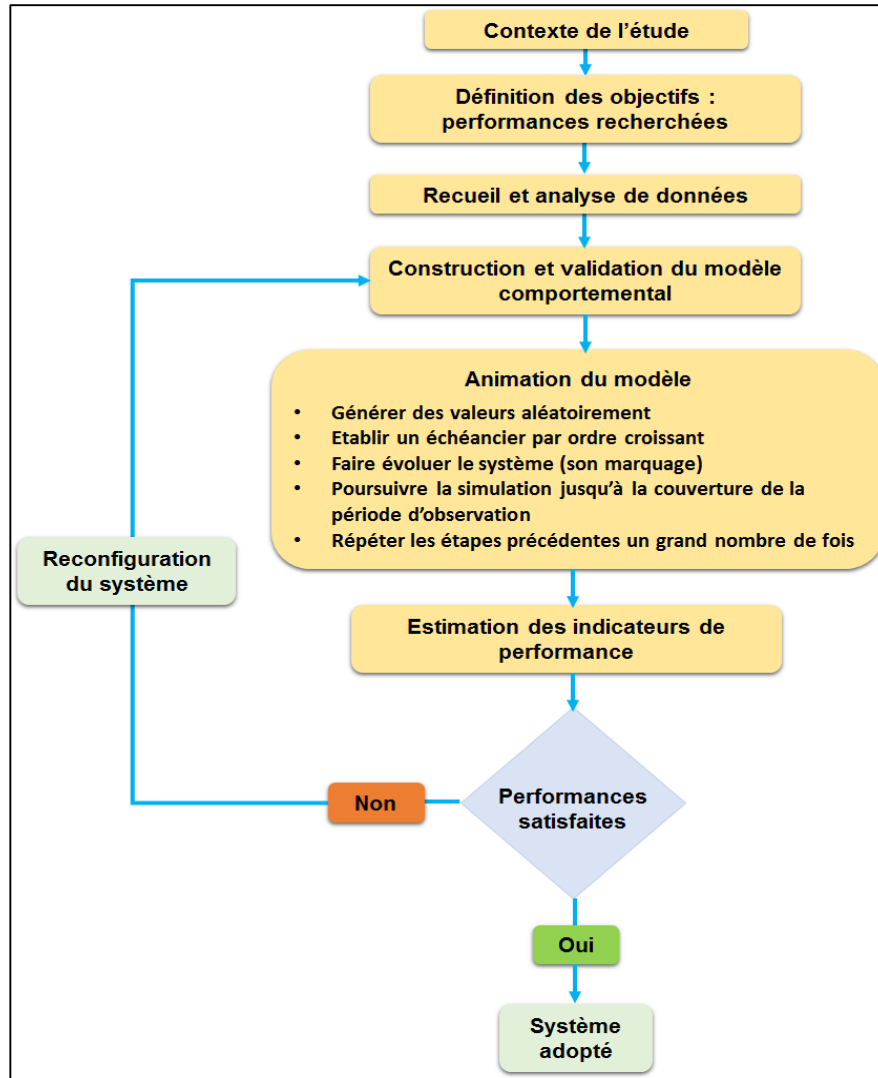


Figure 4.7 : Etapes d'une procédure de Monte Carlo [90]

4.4.2. Exemple illustratif : couplage entre RdPS et simulation Monte Carlo

Dans cette section nous allons illustrer les différents concepts évoqués précédemment, ayant trait aux RdP et simulation de Monte Carlo sur un système simple relatif à la réparation d'un équipement situé sur une plateforme offshore. L'application de la procédure précédente nous a permis de récolter les informations suivantes [91]:

- La capacité de production de l'équipement est de 70%.

- Cet équipement peut être dans l'un des trois états suivants : marche, panne et attente de réparation (initialement cet équipement est opérationnel).
- Sa probabilité de défaillance suit une loi exponentielle de paramètre $\lambda = 1E-4 \text{ h}^{-1}$.
- Une fois en panne, un processus est déclenché afin de procurer la pièce de rechange d'un stock situé à plusieurs kilomètres de la plateforme. Supposons que ce stock contient 12 pièces de ce genre. La durée d'attente de la pièce est aléatoire, car elle dépend de la disponibilité du navire et des conditions météo. Elle est modélisée à l'aide d'une loi exponentielle de paramètre $d = 1/7$ jours ($1/168 \text{ h} \approx 6E-3 \text{ h}^{-1}$).
- La réparation de cet équipement suit également une loi exponentielle de paramètre $\mu = 1/15 \text{ h}$ ($6.67E-2 \text{ h}^{-1}$).
- Cette réparation nécessite la disponibilité de 3 réparateurs du site (équipe constituée de 5 réparateurs) et d'un réparateur externe, d'une équipe composée de 7 réparateurs. Ce dernier peut rejoindre la plateforme en hélicoptère en une durée supposée constante et égale à 10 h.

Le RdPS correspondant est donné à la figure 4.8. Il possède huit places $\{P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, P_6, P_7, P_8, P_9\}$ et six transitions $\{T_1, T_2, T_3, T_4, T_5, T_6\}$. Initialement (à $t = 0$), le marquage du RdP peut être représenté par le vecteur $M_0 = [1, 0, 0, 5, 7, 0, 0, 12, 0]$, ce qui signifie qu'il existe initialement un jeton dans P_1 , 5 jetons dans la place 4, 7 jetons dans la place 5 et pas de jetons dans le reste des places. Les places P_1, P_2 et P_3 correspondent aux états possibles de l'équipement et représentent respectivement les états de marche, attente de réparation et réparation. P_4 et P_5 sont des places auxiliaires qui modélisent respectivement la disponibilité de l'équipe de réparation interne (5 réparateurs sont initialement disponibles : marquage de la place P_4) et l'équipe de réparation externe (7 réparateurs sont initialement disponibles : marquage de la place P_5). La place P_8 décrit le stock des pièces de rechange. Les transitions T_1, T_2 et T_3 modélisent les événements se produisant sur le composant, respectivement : défaillance, début de réparation et fin de réparation. De plus, les transitions T_1, T_3 et T_6 possèdent des délais stochastiques définis par $d_1 = f(\lambda)$, $d_3 = f(\mu)$ et $d_6 = f(d)$ respectivement. La fonction f est une fonction exponentielle négative. Les transitions T_2, T_4 et T_5 sont déterministes ($d_2 = 0$: transition instantanée, $d_4 = d_5 = 10 \text{ h}$).

Initialement, seule la transition T_1 est valide, car le poids de son arc amont (reliant P_1 à T_1) est égal au marquage de P_1 (nombre de jetons = 1). T_1 est franchie (tirée) dès que son délai d_1 est écoulé. d_1 est un délai stochastique obtenue par échantillonnage de Monte Carlo en utilisant la transformation inverse de la fonction f : $d_1 = -(1/\lambda) \cdot \ln(R)$, où R est une variable aléatoire uniformément répartie sur $[0, 1]$ (voir figure 4.9). Le tir de T_1 entraîne la suppression du jeton de

P_1 , l'ajout d'un jeton dans P_2 et produit l'assertion « $Cap = 0$ », indiquant la capacité de production de l'équipement qui vient de tomber en panne est nulle. Le composant atteint un état de panne et attend sa réparation. Par conséquent, les transitions T_4 et T_6 deviennent valides car le nombre de jetons dans leurs places respectives (P_5 et P_8) est suffisant, ainsi que la garde ($Cap = 0$) est devenue vraie. Ces places représentent respectivement l'équipe de réparation externe et le stock des pièces de rechange. Une fois les délais attachés aux transitions T_4 et T_6 sont écoulés (d_4 et d_6 , ce dernier est calculer de la même manière que d_1) ces transitions son tirées et en conséquence un jeton et retiré de chacune des places P_5 et P_8 et un jeton et un jeton apparait dans chacune des places P_6 et P_9 , indiquant la disponibilité du réparateur externe et de la pièce de rechange sur site, respectivement. A cet effet, la transition T_2 devient valide car le nombre de jetons dans les places amont (P_2 , P_4 , P_6 et P_9) satisfait aux exigences des poids des arcs qui s'y associent. Notons que le tir de T_2 coïncide avec l'instant de sa validation ($d_2 = 0$). Ce tir a pour effet de retirer le jeton de la place P_2 , 3 jetons de la place P_4 , un jeton de chacune des places P_6 et P_9 et un jeton apparaît à la place P_3 . La réparation de l'équipement s'amorce alors car la transition T_3 devient valide. Cette dernière est franchie dès que son délai est consumé ($d_3 = -(1/\mu) \cdot \ln(R)$). A l'occasion de ce franchissement, les trois réparateurs de l'équipe interne sont libérés (3 jetons réapparaissent dans la place P_4), l'équipement redevient disponible (un jeton est affecté à la place P_1 et l'assertion $Cap = 70$ est émise) et le réparateur externe est également libéré (marquage de la place P_7 avec un jeton) et regagne l'équipe externe après un délai de 10 h (le jeton quitte la place P_7 et rejoint la place P_5). Il convient de souligner que le RdPS ne retrouve pas son marquage initial à ce moment-là car la pièce de rechange est consommée. L'approvisionnement en pièces de rechange peut être modélisé à l'aide d'un RdP auxiliaire.

Et ainsi de suite tant que le tir de la prochaine transition valide appartient à la période d'observation (réalisation de la première histoire). Ce processus reprend de nouveau à partir du marquage initial afin de réaliser le nombre d'histoires recherché. Une fois le nombre d'histoire atteint, un échantillon statistique est disponible et permet d'estimer les différents indicateurs recherchés : disponibilité de l'équipement (marquage de la place P_1), nombre des pièces de rechange (marquage de la place P_8), durée d'attente de réparation (marquage de la place P_2), capacité de l'équipement (variable Cap), ...

Ces indicateurs peuvent être calculés en fonction du temps ou sur la période d'observation (valeurs moyennes).

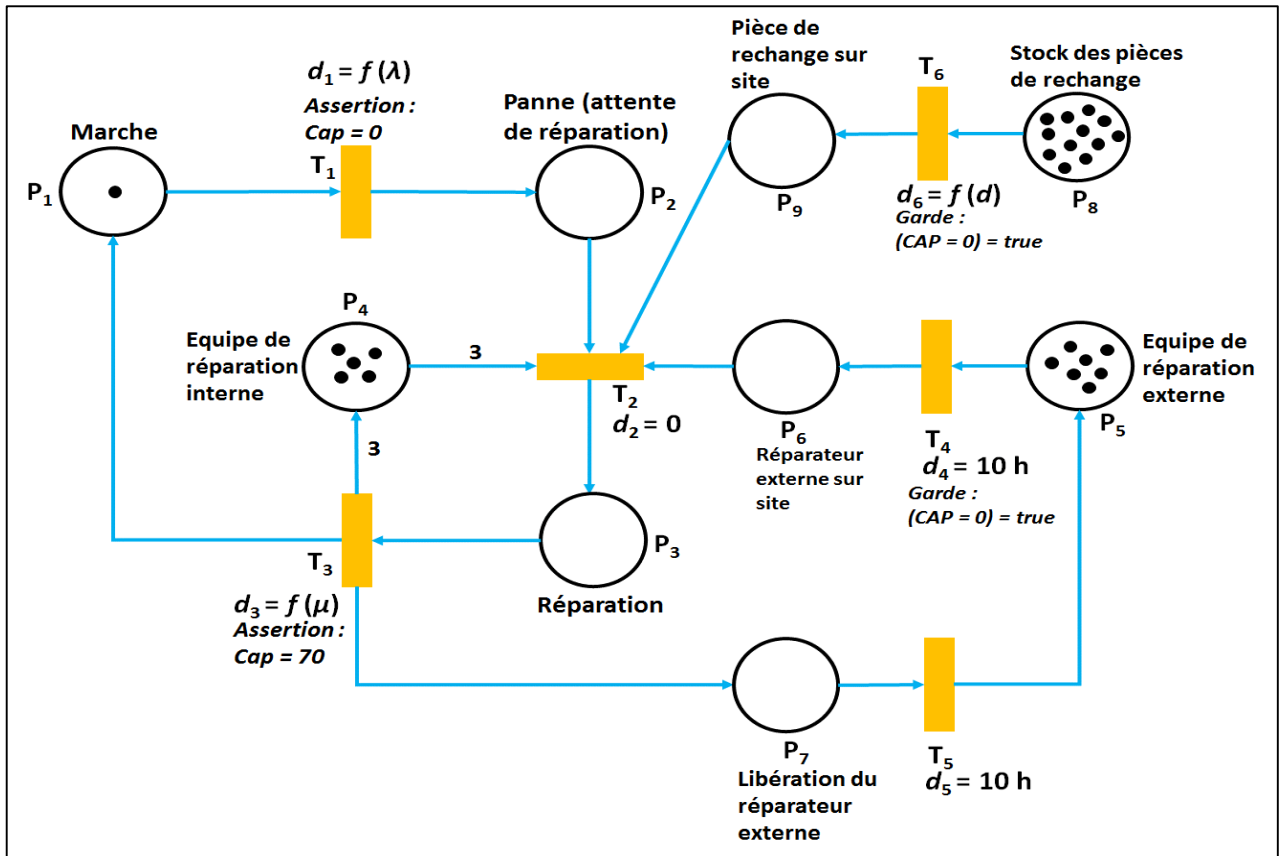


Figure 4.8 : RdPS relatif au cas illustratif [92]

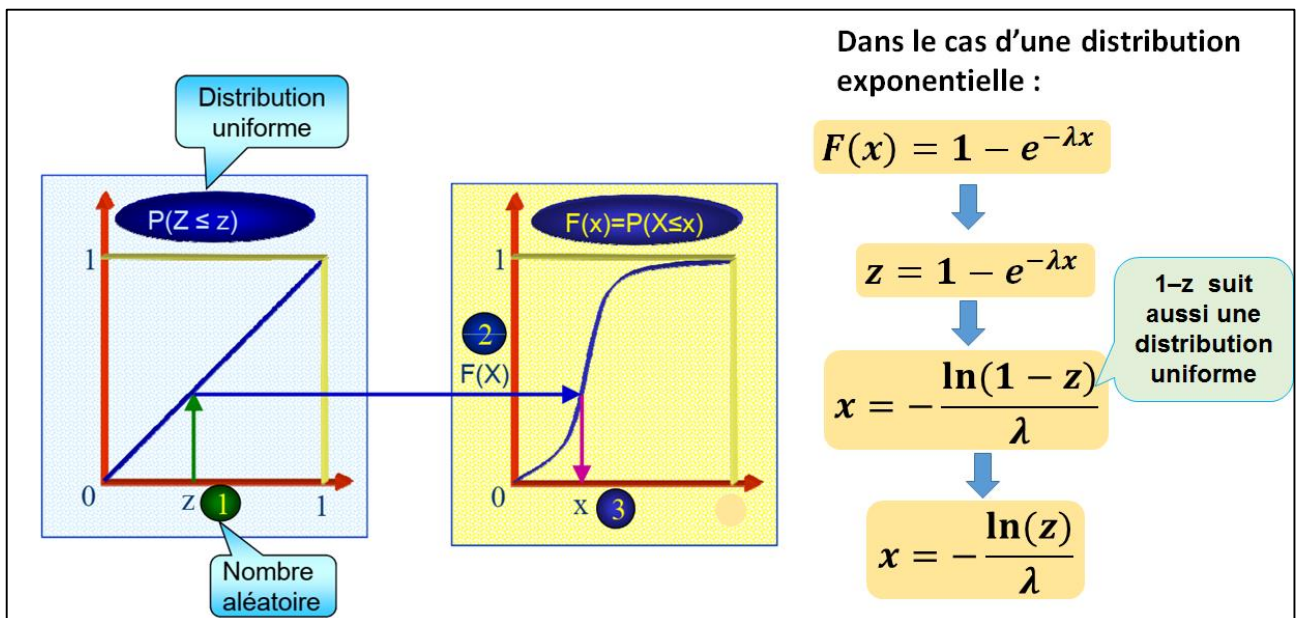


Figure 4.9 : Génération d'un délai aléatoirement selon une loi exponentielle [92]

4.4. Modélisation du PII à l'aide des RdPS

Dans cette section nous allons procéder à la modélisation du PII introduit au chapitre précédent à l'aide des RdPS (réseaux de Petri stochastiques). La modélisation fonctionnelle à l'aide des approches IDEF0 et BPMN nous a permis d'avoir une description structurée du déroulement du PII. Dans ce chapitre nous allons développer cette description avant de procéder à la modélisation proprement dite du PII.

4.4.1. Description détaillée du scénario accidentel et du déroulement de l'intervention

Comme indiqué au chapitre 3, le scénario considéré est un incendie initié par une fuite de gazoline au niveau de la sphère de stockage 76-MD-03. Le siège de la fuite (perte de confinement) et la ligne de sortie 8'' vers l'aspiration de la pompe d'expédition 76-MJ-03A. Ce scénario a été identifié lors de l'étude règlementaire EDD du complexe GL1/k (scénario 14b). Une description fine de la séquence de déroulement des activités d'intervention est donnée ci-après.

➤ Phase 1 :

- Perte de confinement de la ligne d'expédition de gazoline.
- Détection de la présence de gaz aux alentours de la sphère Gazoline affiché sur CCR (salle de contrôle) par détecteur de gaz 63GD07B003 (alarme 20 % LIE).
- Confirmation de la fuite par système vidéo surveillance (CCTV) caméra n° 71DNVS C501.
- Départ de la première équipe d'intervention depuis le local d'intervention vers la zone de stockage.
- Arrivée de l'équipe sur place et évaluation de la situation.
- Information de la hiérarchie de la situation.
- Activation de l'alarme fuite de gaz.
- FIR informé de la situation.
- Protection Civile alertée et informée de la situation par la FIR.
- Isolement et l'arrêt des pompes d'expédition (76-MJ-03 et 76-MJ-03A). Nous supposons que la fermeture de la vanne 76ESDV1060 permet de contrôler la fuite (voir figure 4.10). D'autres considérations relatives à l'arrêt de réception du produit depuis le méga-train (vannes d'alimentation gaz et liquide, voir figure 4.10) peuvent être facilement prises en compte. L'opération d'isolation doit être effectuée rapidement afin de limiter la quantité de gazoline dégagée. Dans le cas contraire, une aggravation de l'incident est très probable. Nous considérons un temps critique de 15 minutes.

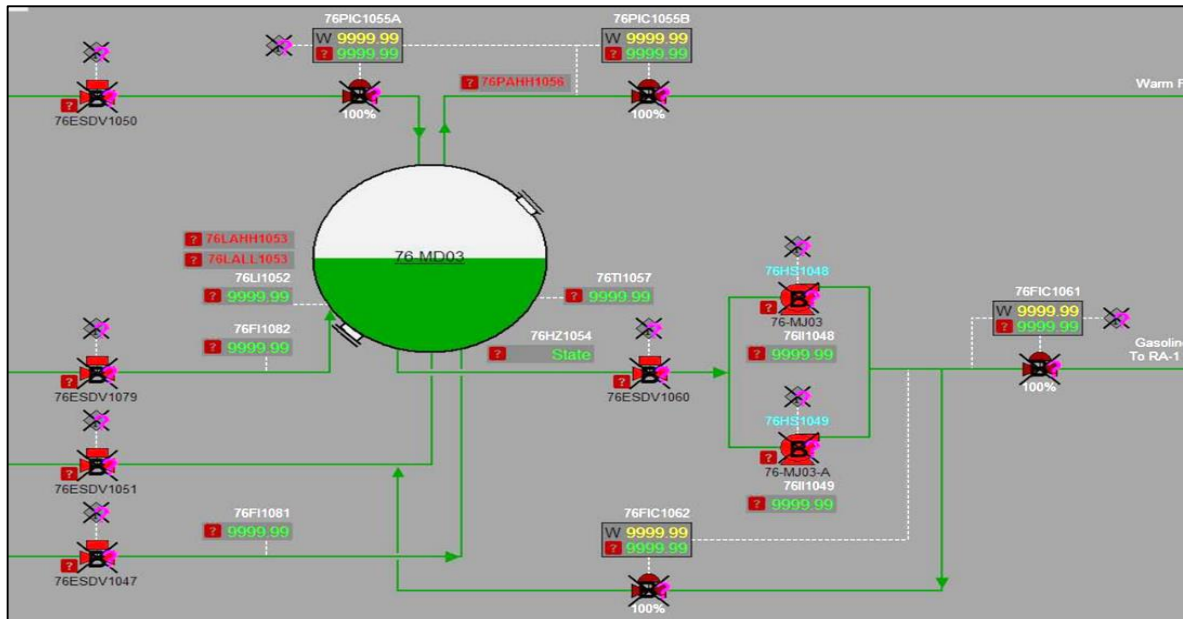


Figure 4.10 : Isolation de la sphère

- Limitation d'accès vers la zone d'intervention.
- Prévenir toute source d'ignition (arrêt de tous les travaux).
- Circonscrire la fuite par la mise en action des rideaux d'eau fixe et mobile (canons fixes et déflecteurs mobiles).
- Situation persiste, la fuite prend de l'ampleur

➤ **Phase 2 :**

- Départ d'un Feu Flash (*flash fire*) suivi d'une explosion avec plusieurs foyers de feu à l'extérieure (zone pompes) et à l'intérieur de la cuvette.
- 04 Agents d'intervention, 02 opérateurs et 04 chaudronniers blessés (brûlures et fractures).
- Monté en puissance de la situation (critique).
- Le directeur de PDOI ordonne l'arrêt total de l'installation et la fermeture de l'arrivée gaz depuis RTE.
- Le responsable PCT informe le PCS de la situation.
- Attaque simultanée par les 05 équipes par lances à mousse et canon mousse mobile.
- Transformation de 50% des lances mousse bas foisonnement en lances mousse moyens foisonnement en progressant vers la cuvette

➤ **Phase 3 :**

- Le directeur ordonne l'évacuation du personnel non essentiel vers les points de rassemblement.
- Feu de cuvette s'est généralisé.
- 04 agents d'intervention brûlés.

- Suite au nombre important des blessés, le directeur demande au PCT le déploiement du PMA (poste médical avancé).
- PMA installé à côté du CMT GL1K.
- Enregistrement de l'état des admissions des victimes au niveau du PMA.
- Prise en charge des victimes par priorité.
- Mise en action des générateurs à mousse haut foisonnement
- Étalage de la mousse en continu de 04 côtés de la cuvette.
- PDOI demande au PCT camions suceurs pour évacuation produit décanté.
- Feu de cuvette étouffé.
- Extinction feu de torche au-dessous de la sphère.
- Arrivée de 02 camions suceurs.
- Aspiration du produit par Camions suceurs.
- Poursuite de l'opération d'étalage de la mousse jusqu'à refroidissement du produit inflammable restant.
- Récupération du produit à l'aide d'un camion suceur.
- Fin d'alerte

Pour plus de visibilité ayant trait à la maîtrise ou à l'aggravation de l'incident, nous dressons l'arbre d'événements (organigramme) donnée à la figure 4.11. De plus, le tableau 4.2 regroupe les différentes données liées aux durées d'exécution des tâches, caractéristiques de fiabilité des équipements et les descriptions fonctionnelles de certaines activités.

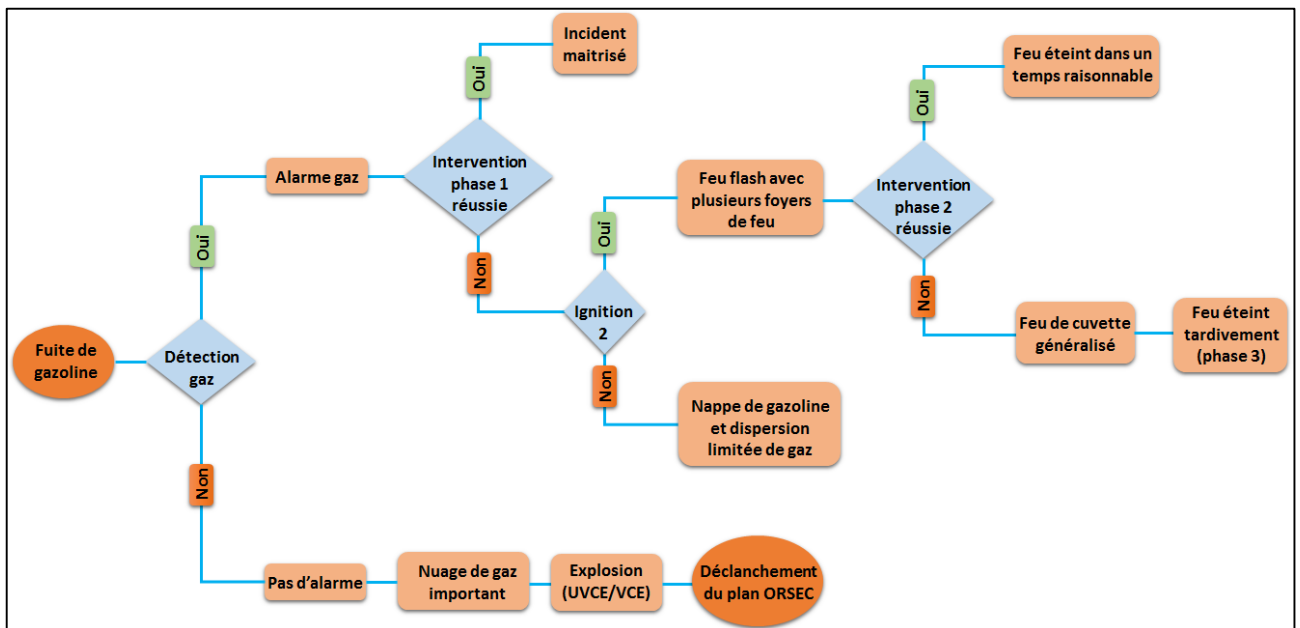


Figure 4.11 : Scénario d'escalade

Tableau 4.1 : Données relatives au déroulement de l'intervention

Événement Tâche Activité	Description	Équipement	Probabilité de défaillance	Durée de réalisation (min)
Fuite de gazoline	Dans le cadre de ce travail, nous nous n'intéressons pas aux mécanismes de perte de confinement. Dans notre modèle RdP nous considérons l'événement perte de confinement comme certain. Néanmoins, ces mécanismes peuvent être pris en compte.	ligne de sortie 8'' vers l'aspiration de la pompe d'expédition	1.0	NA
Détection gaz	La détection est assurée par le détecteur de gaz 63GD07B003 (alarme 20 % LIE). Notons que la chaîne de détection comporte le détecteur de gaz lui-même, l'automate de sécurité (PLC) et l'indication au niveau de la salle de contrôle (GI). La défaillance de l'un de ces trois éléments ne permet pas la détection de la présence de gaz. Cette détection est confirmée par le système vidéo surveillance (CCTV) caméra n° 71DNVS C501 . Bien entendu, la détection par camera suffit à elle seule même dans le cas de la défaillance du détecteur de gaz. Aussi, la fuite peut être détectée par les opérateurs sur place (pendant les rondes).	63GD07B003	0.008	0 (instantanée)
		PLC	0.011	
		GI	0.001	
		71DNVSC501	0.001	0
		Rondes des opérateurs : ces opérateurs sont dans la proximité du réservoir de stockage 10% du temps	0.9	3
Activation de l'alarme	Une fois la détection confirmée, départ de la première équipe d'intervention depuis le local d'intervention vers la zone de stockage. Sur place, elle procède à l'évaluation de la situation et en informe la hiérarchie. Ce n'est qu'à ce moment-là que l'alarme est activée. L'efficacité de cette action est estimée à 97 %	Départ de l'équipe d'intervention	0.03 (non efficacité de l'équipe)	5
		Equipe sur place		3
		Personne activant l'alarme		1
		20 (en cas de non efficacité de l'équipe)		
Intervention durant la phase 1	Isolement procès : nous supposons que la fermeture de la vanne 76ESDV1060 permet à elle seule de contrôler la fuite. Nous supposons un temps critique de 15 min , une fois dépassé, une aggravation de l'incident est très probable.	Vanne 76ESDV1060	0.028	0 (automatique ment à partir de l'activation de l'alarme)
			0	5 (avec action humaine)
	Prévention de toute source d'ignition (arrêt de tous les travaux) et limitation d'accès vers la zone d'intervention. Le pourcentage de succès de cette opération est estimé à 85 %	Procédure	0.15	5 (à partir de l'activation de l'alarme)

	Circonscription de la fuite par la mise en action des rideaux d'eau fixe et mobile (canons fixes et déflecteurs mobiles) des quatre côtés de la sphère. Supposons que le fonctionnement de tous canons fixes et déflecteurs mobiles est nécessaire pour assurer une bonne circonscription. L'efficacité des rideaux d'eaux est de 95 %	Canons fixes et déflecteurs mobiles (assumons l'existence de quatre canons)	0.02 (chaque canon)	5 (réalisée en parallèle avec l'action précédente)
Feu flash avec plusieurs foyers de feu	Si la fuite prend de l'ampleur (isolement non réalisée durant le temps critique de 15 min), non maîtrise des sources d'ignition et circonscription non pratique de la fuite.	NA	NA	NA
Intervention durant la phase 2	Le directeur du PDOI ordonne l'arrêt total de l'installation	Message	0	3
	Le responsable PCT informe le PCS de la situation	Message	0	3
	Attaque du feu (plusieurs équipes). Nous supposons que l'ensemble des équipements doit fonctionner.	03 Camions VMR 115	0.01	20 (après le déclenchement du feu : temporisation) + 15 (extinction)
		02 Camion mixte (eau/mousse) de grande puissance	0.01	
01 Camion ravitailleur émulseur	0.01			
Réseau incendie	0.01			
Feu de cuvette généralisé	Suite à la non réussite de l'extinction du feu durant la phase 2	NA	NA	NA
Intervention durant la phase 3	Le directeur ordonne l'évacuation du personnel non essentiel	Message	0	3
	Le directeur demande au PCT le déploiement du PMA (poste médical avancé).	Message	0	3
	Mise en action des générateurs à mousse haut foisonnement et étalage de la mousse en continu de 04 côtés de la cuvette.	générateurs à mousse haut foisonnement, ...	0	NA

4.4.2. Modélisation du déroulement des interventions PII via les RdPS

Nous avons mis à profit le module Petri de la suite logiciel GRIF [93] afin de modéliser le déroulement des différentes étapes décrites au tableau 4.2. Une copie écran de l'interface graphique du module Petri est fournie à la figure 4.12. Quelques explications relatives à la syntaxe utilisée sont données ci-dessous :

- **#i** : le marquage de la place *i*.
- **!!** : introduit une liste des assertions qui se mettent à jour lors du tire des transitions.
- **??** : spécifie une liste des gardes qui doivent être vérifiées pour que la transition soit activée.
- **drc d**: loi de Dirac pour le délai **d** (délai déterministe).
- **@ (k) (e₁, e₂,..., e_n)** est une logique de type *k* parmi *n* (e_i sont des expressions booléennes).

- Les informations mentionnées au niveau d'une transition donnée sont données dans l'ordre suivant : numéro, nom, loi caractérisant le délai de tir, gardes et assertions.

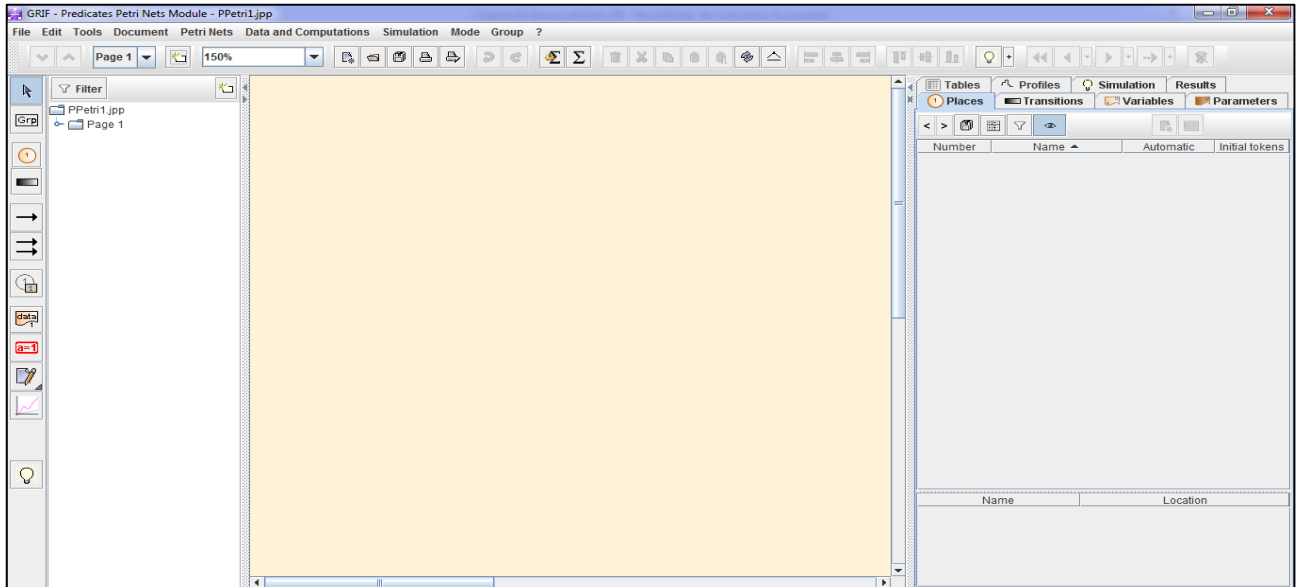


Figure 4.12 : Interface graphique du module Petri (logiciel GRIF)

Les différents modèles réalisés sont donnés aux figures suivantes.

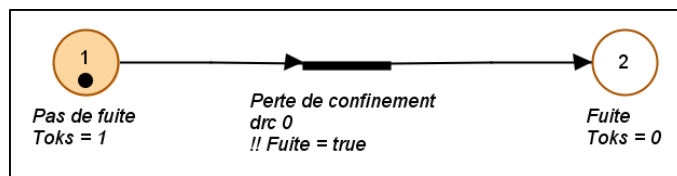


Figure 4.13 : Occurrence de la fuite

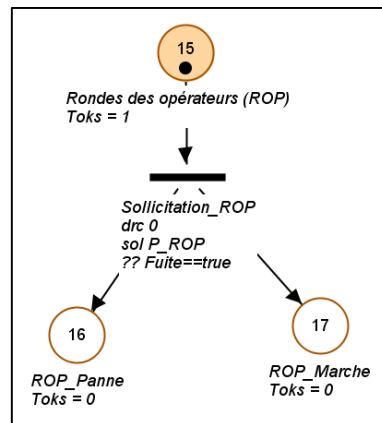


Figure 4.14 : Ronde opérateurs

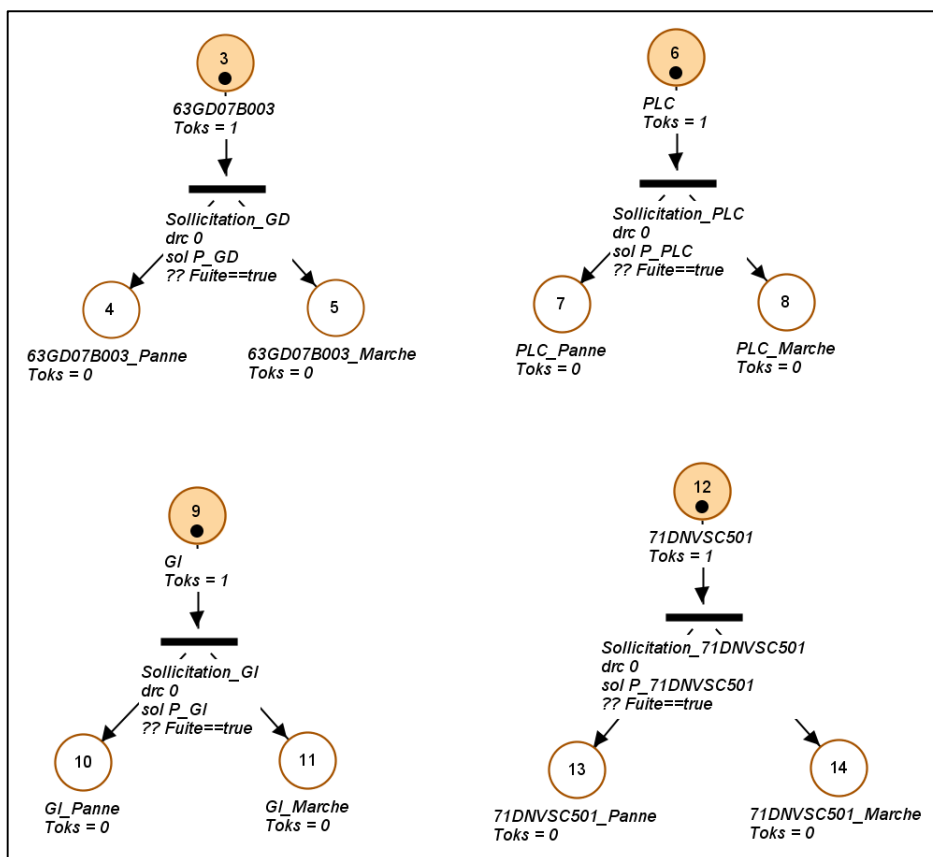


Figure 4.15 : Equipement de détection automatique

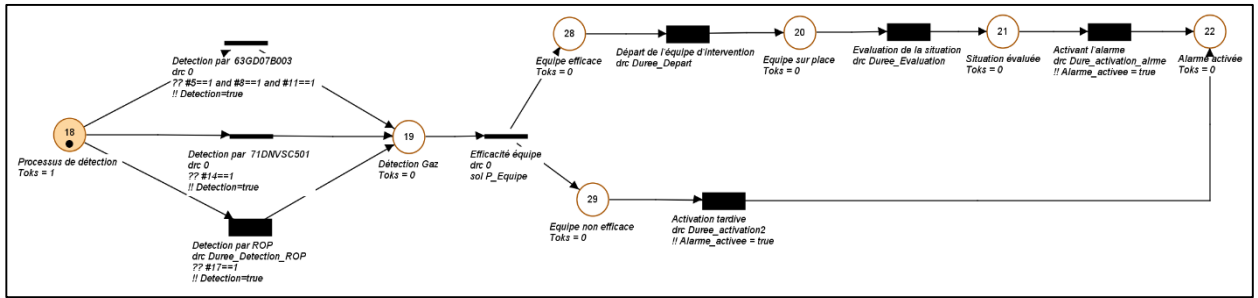


Figure 4.16 : Processus d'activation de l'alarme fuite

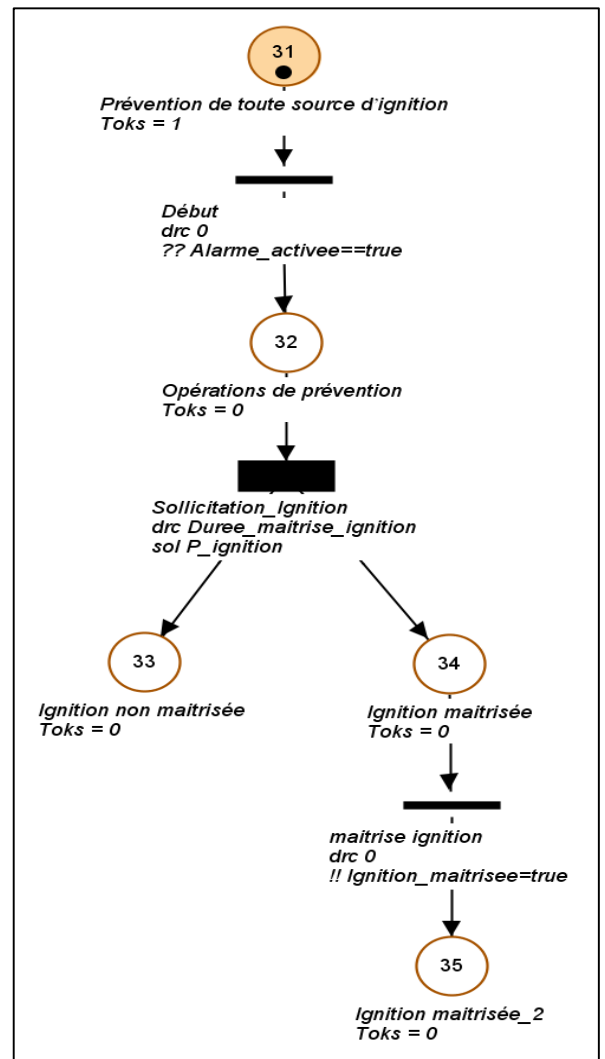
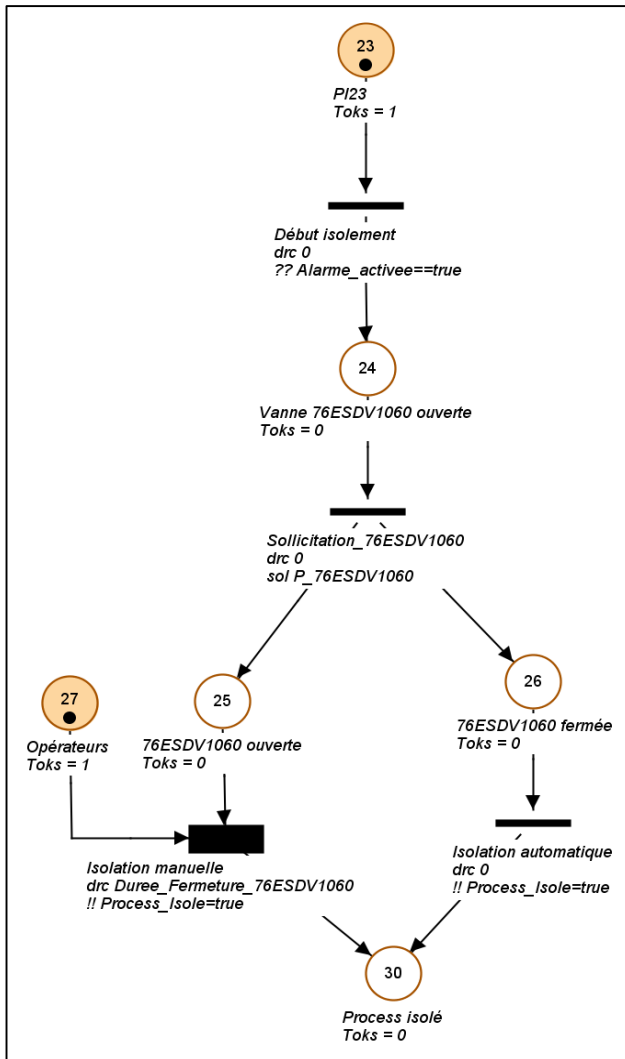


Figure 4.17 : Processus d'isolation procédé et maîtrise des sources d'ignition

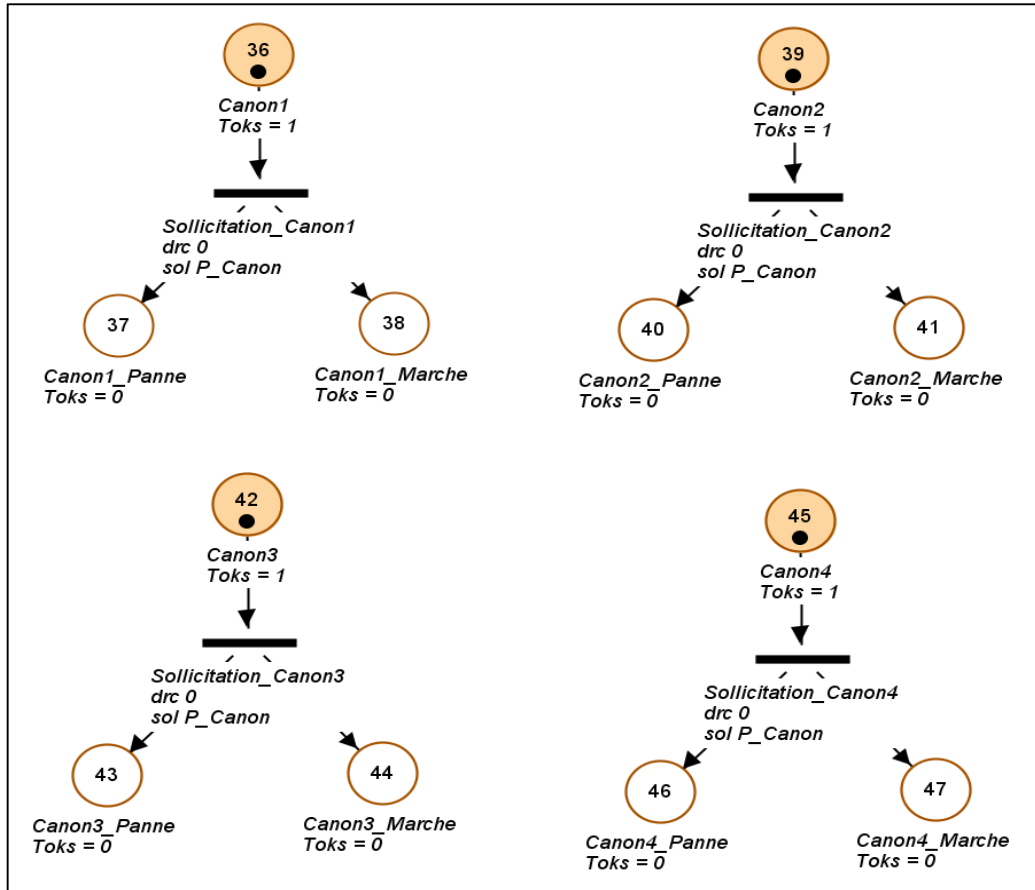


Figure 4.18 : Canons de circonscription de la fuite

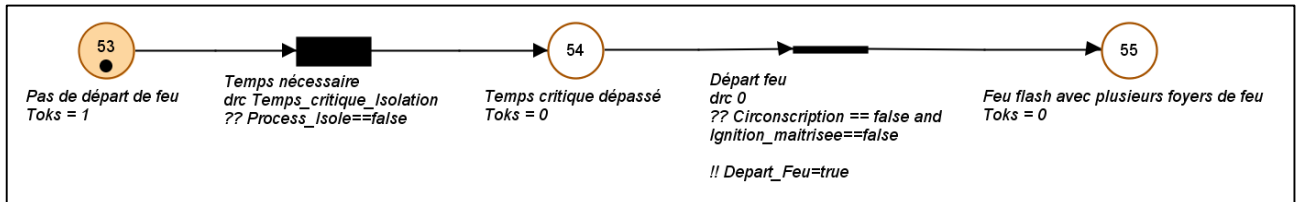


Figure 4.19 : Processus de déclenchement du feu flash

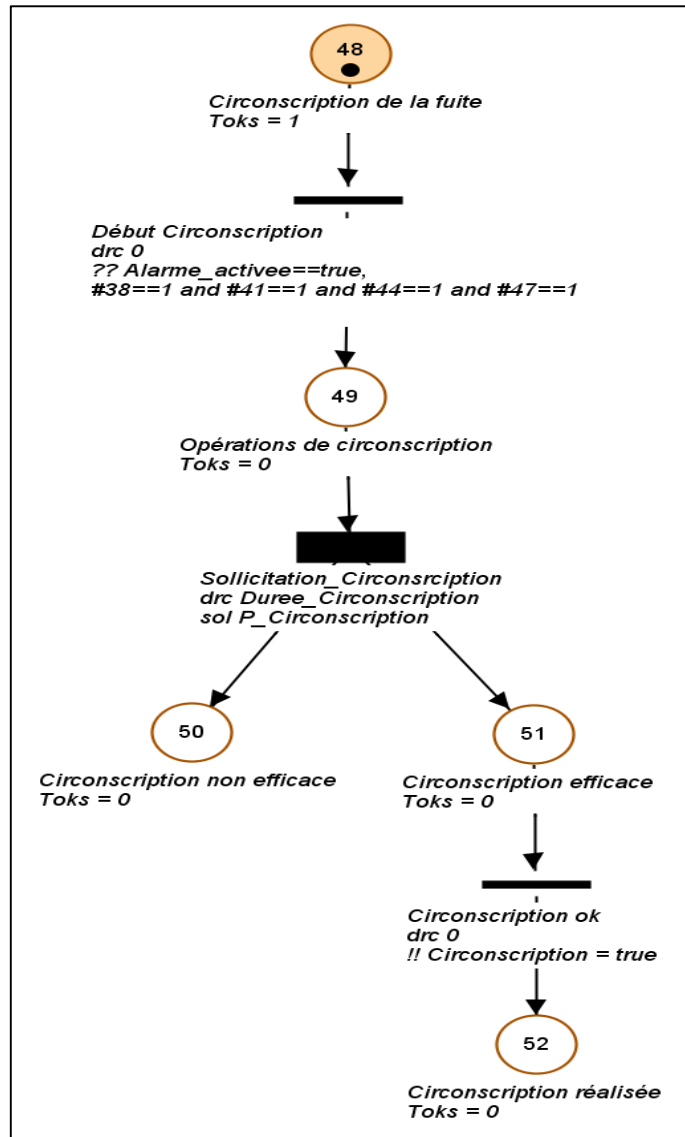


Figure 4.20 : Processus de circonscription de la fuite

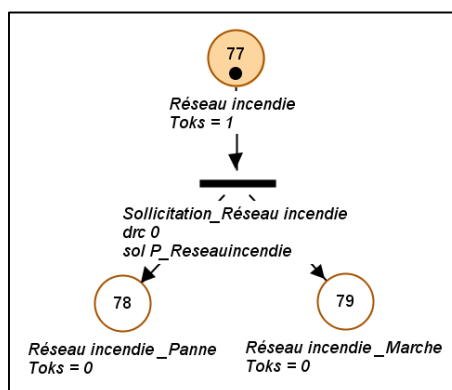


Figure 4.21 : Disponibilité réseau incendie

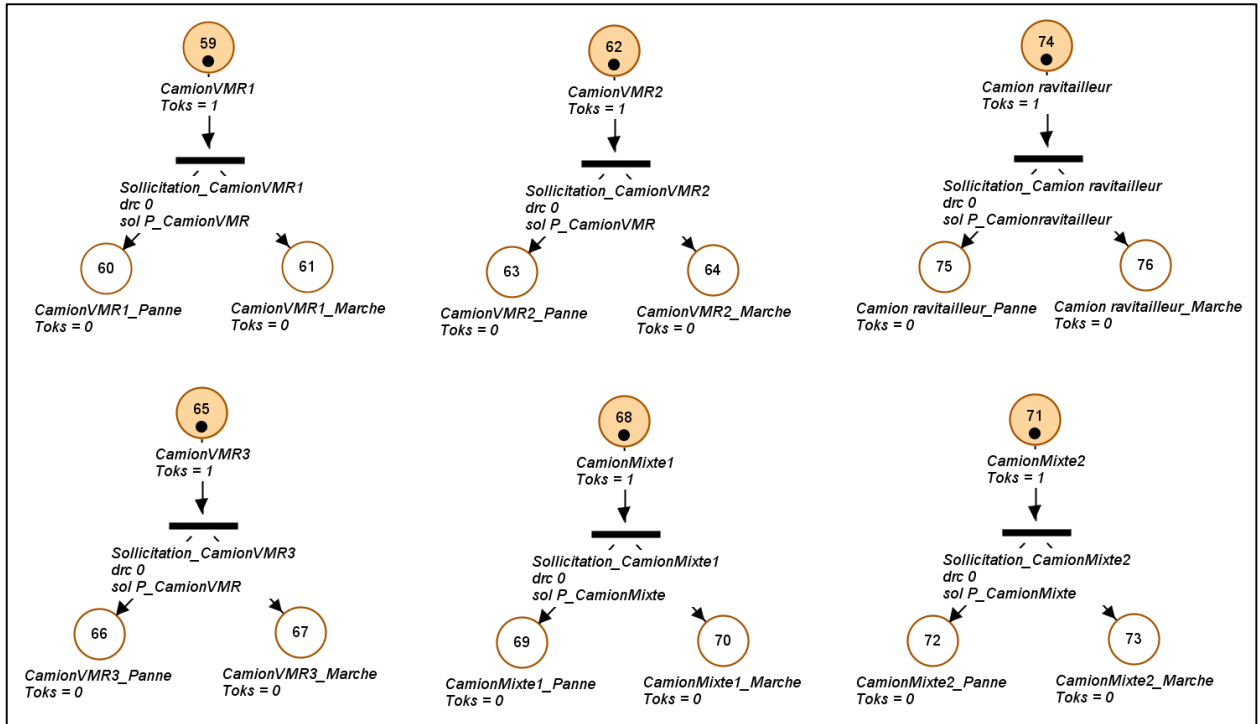


Figure 4.22 : Camions d'intervention

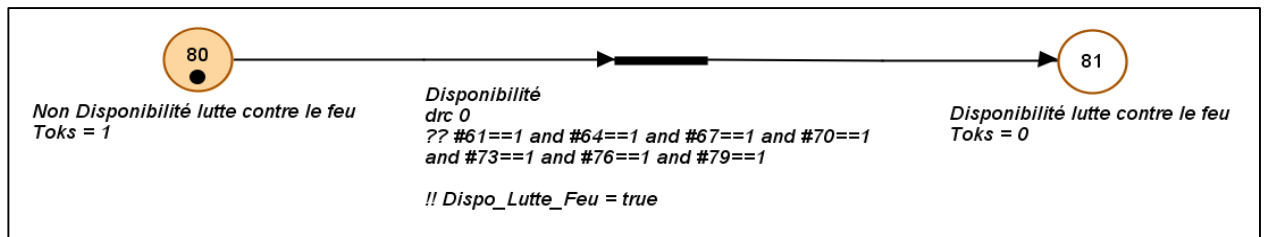


Figure 4.23 : Disponibilité des moyens d'intervention

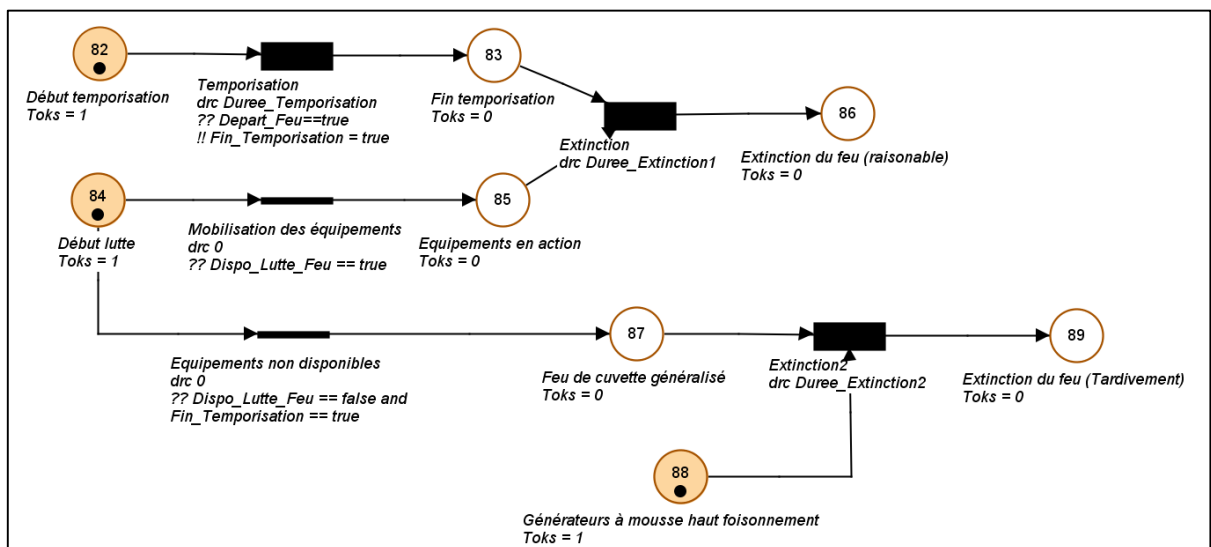


Figure 4.24 : Processus d'extinction du feu

Les différentes variables utilisées de même que leurs définitions sont données au tableau 4.3

Tableau 4.2 : Les différentes variables utilisées

Domaine	Nom	Définition	Valeur
Bool	Alarme_activee	false	false
Bool	Circonscription	false	false
Bool	Depart_Feu	false	false
Bool	Detection	false	false
Bool	Dispo_Lutte_Feu	false	false
Float	Duree_activation_alrme	1.0	1.0
Float	Duree_activation2	20.0	20.0
Float	Duree_Circonscription	5.0	5.0
Float	Duree_Depart	5.0	5.0
Float	Duree_Detection_ROP	3.0	3.0
Float	Duree_Evaluation	3.0	3.0
Float	Duree_Exinction1	15.0	15.0
Float	Duree_Exinction2	30.0	30.0
Float	Duree_Fermeture_76ESDV1060	5.0	5.0
Float	Duree_Lutte1	15.0	15.0
Float	Duree_maitrise_ignition	5.0	5.0
Float	Duree_Temporisation	20.0	20.0
Bool	Extinction_Feu_raisonable	#86==1	false
Bool	Extinction_Feu_tardive	#89==1	false
Bool	Extinction_Raisnable_Tardive	#86==1 or #89==1	false
Bool	Feu_Cuvette_Generalise	#87==1	false
Bool	Fin_Temporisation	false	false
Bool	Fuite	false	false
Bool	Ignition_maitrisee	false	false
Bool	Isolement_procede	#30==1	false
Bool	Lutte_Feu	false	false
Bool	Ordre_arret_total	false	false
Float	P_71DENVSC501	0.0010	0.0010
Float	P_76ESDV1060	0.028	0.028
Float	P_CamionMixte	0.01	0.01
Float	P_Camionravitailleur	0.01	0.01
Float	P_CamionVMR	0.01	0.01
Float	P_Canon	0.02	0.02
Float	P_Circonscription	0.05	0.05
Float	P_Equipe	0.97	0.97
Float	P_GD	0.0080	0.0080
Float	P_GI	0.0010	0.0010
Float	P_ignition	0.15	0.15
Float	P_PLC	0.011	0.011
Float	P_Reseauincendie	0.01	0.01
Float	P_ROP	0.9	0.9
Bool	PCS_informe	false	false
Bool	Process_Isole	false	false
Float	Temps_critique_Isolation	15.0	15.0

4.4.3. Evaluation des indicateurs de performance d'intérêt

Les différents résultats sont obtenus à l'aide de la simulation du RdPS précédents. Plusieurs types de mesures peuvent être obtenus. Nous nous sommes intéressés aux probabilités de certains. La figure 4.25 montre ces probabilités en fonction du temps de déroulement des interventions pour les événements : activation de l'alarme, circonscription de la fuite, disponibilité des moyens de lutte et l'isolement du procès. Nous remarquons l'efficacité du processus d'isolement qui est proche de 100 %. Elle est égale à 97 % au temps critique de 15 min. Au temps 20 min, cette efficacité est proche de 100 %. Aussi, la maîtrise de la fuite est réalisée avec une probabilité proche de 0.877. L'ensemble de ces mesures montre l'efficacité de ces processus.

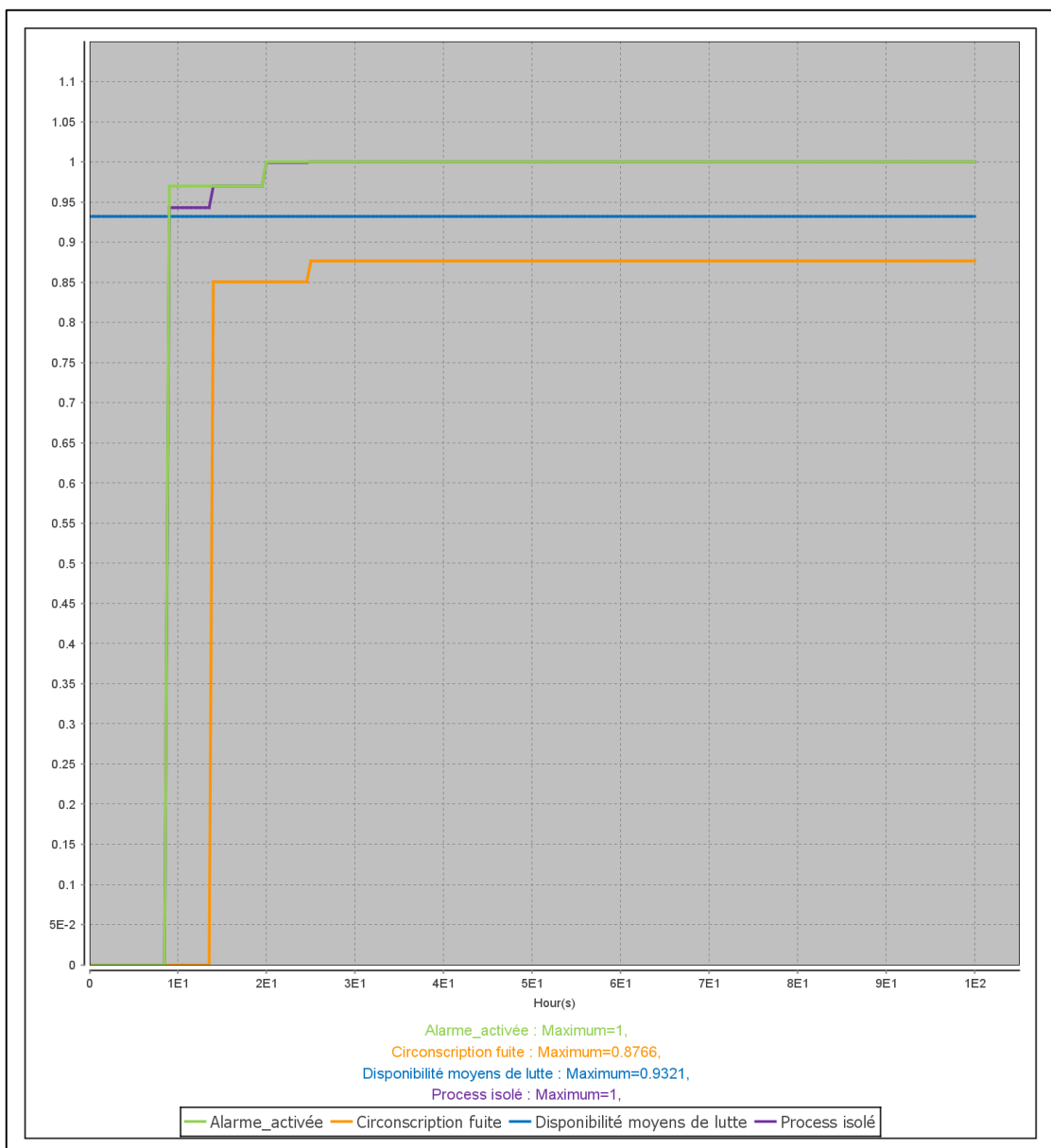


Figure 4.25 : Evolution des probabilités relatives aux : activation de l'alarme, circonscription de la fuite, disponibilité des moyens de lutte et l'isolement du procès

La figure 4.26 montre que les probabilités de déclenchement de feu et feu de cuvette généralisé son faible est acceptable, respectivement $2.99E-2$ et $1.79E-3$.

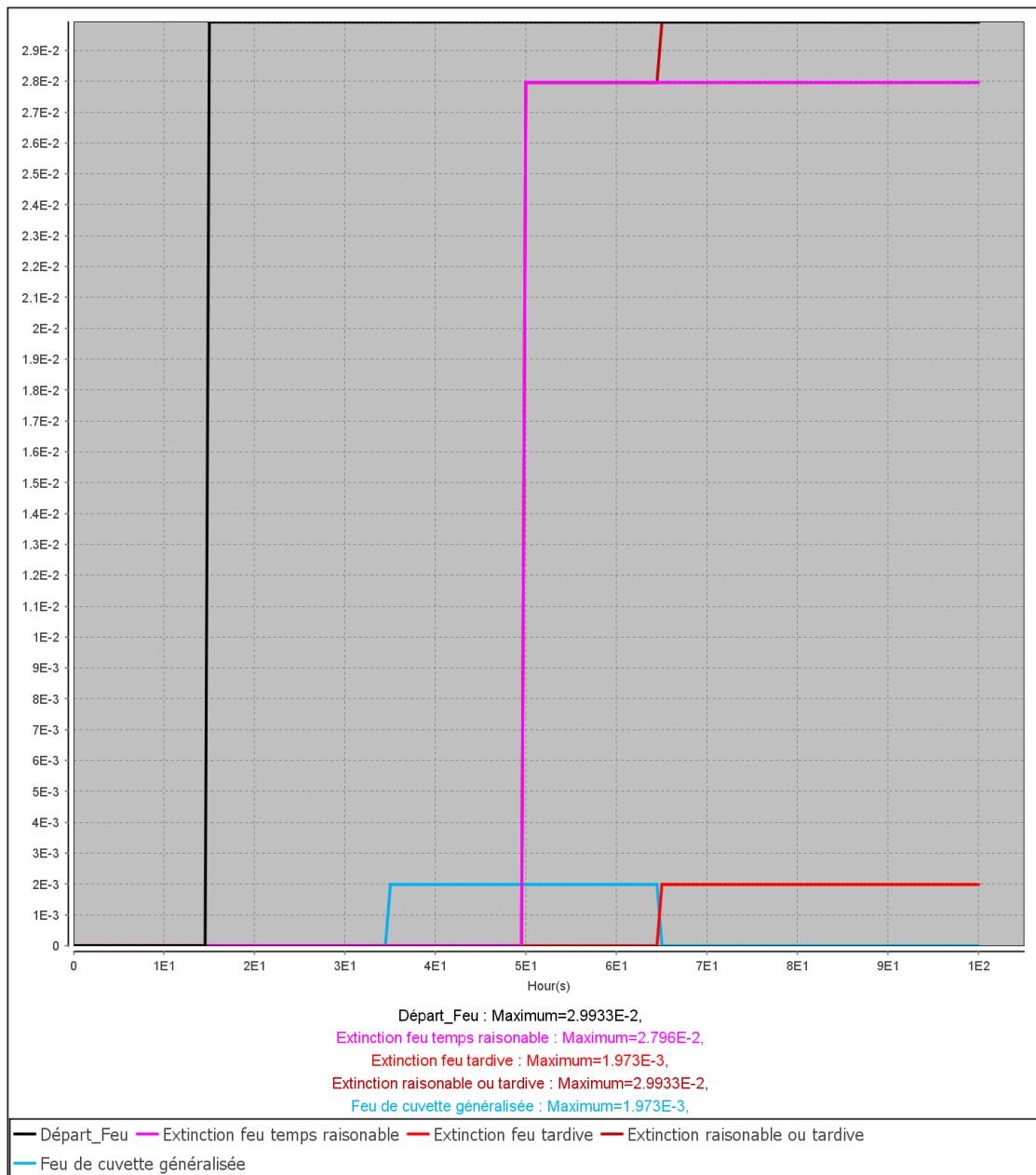


Figure 4.26 : Evolution des probabilités relatives à certains événements

La figure 4.27 illustre les premiers instants d'occurrences des événements précédents.

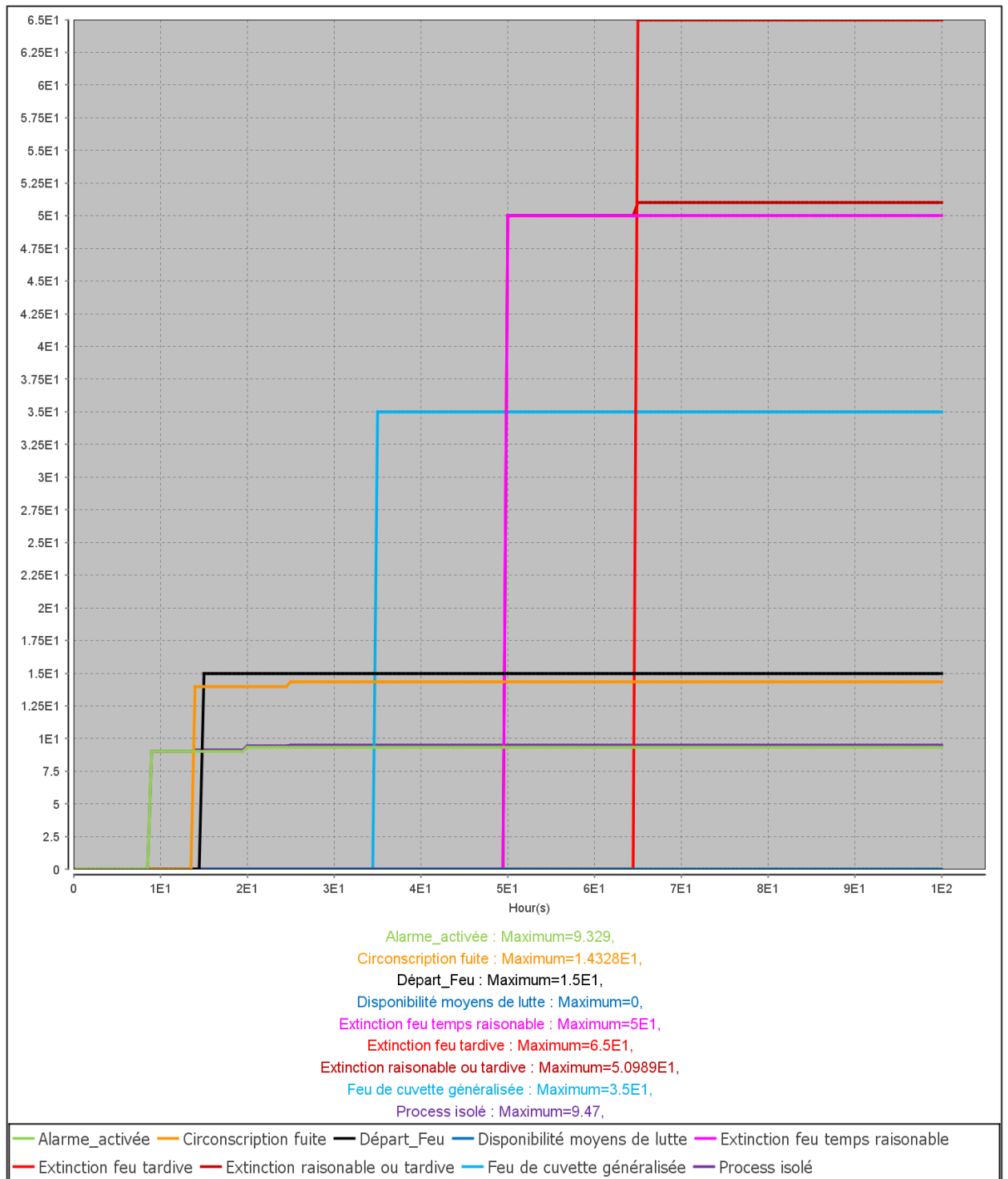


Figure 4.27 : Les premiers instants d'occurrences des différents événements

4.5. Conclusion

Au cours de ce dernier chapitre, nous avons d'abord introduit brièvement les RdP en termes des principales définitions associées et de certaines de leurs extensions. Ensuite, nous avons abordé l'approche dite simulation de Monte Carlo en matière de principe et de procédure. Puis, nous avons illustré le traitement d'un exemple simple d'équipement réparable, dont la réparation est soumise à certaines contraintes, à l'aide des RdPS et la simulation de Monte Carlo. Finalement, la modélisation du déroulement d'un PII a été réalisée via cette approche conjointe, où nous avons décrit d'une manière détaillée ce déroulement, présenté les différents RdPS sous-jacents et les résultats obtenus suite à leur simulation via le module Petri du logiciel GRIF.

A travers ce chapitre, nous avons montré le pouvoir de modélisation conséquent des RdPS dans le traitement des PII. Les résultats obtenus peuvent dévoiler l'efficacité de la stratégie d'intervention et peuvent être exploités pour en améliorer davantage les performances .

Conclusion Générale

Conclusion générale

Les exploitants industriels ont la responsabilité réglementaire d'assurer la protection des personnes, de l'environnement et des biens même en cas de défaillance des barrières de sécurité préventives. Cette protection vise donc la limitation des dégâts et d'empêcher l'escalade de la situation accidentelle initiale. Parmi ces mesures de protection, les plans de réponse aux urgences occupent une place cruciale. En particulier, les plans internes d'intervention (PII) jouent un rôle majeur dans le processus de gestion des urgences, car il en constitue le premier niveau d'intervention. Si son déroulement échoue, les chances de contrôler la situation par le déclenchement des niveaux d'intervention supérieur se verraient amoindries. Une attention particulière doit donc être portée lors de leur élaboration et de leur mise en œuvre, afin de limiter au maximum les failles potentielles et assurer une efficacité maximale des opérations d'intervention.

Dans cette optique, ce travail doctoral rentre dans le cadre de la problématique de modélisation et d'évaluation des performances des PII. Plus précisément, l'objectif de la recherche doctoral était le développement d'une approche structurée permettant une quantification la plus réaliste possible de la performance des plans d'urgence. Dans ce qui suit nous allons rappeler le cheminement logique suivi afin de satisfaire à cet objectif.

D'abord, le premier chapitre a été consacré à la présentation des principaux concepts dans le domaine de la gestion des risques et surtout ceux liés au processus de gestion des urgences.

Ensuite, au cours du deuxième chapitre, nous avons mentionné la place qu'occupe le PII dans le système de gestion des situations d'urgence de SONATRACH (*ICS: Incident Command System*). Aussi, nous avons rappelé successivement le contexte réglementaire et normatif des PII, la démarche de leur élaboration, leur organisation et les différentes approches de modélisation.

Puis, dans le troisième chapitre était dédié d'abord à une présentation détaillée de deux approches de modélisation fonctionnelle, à savoir : IDEF0 et BPMN. Nous avons vu que l'IDEF0 permet une description des différentes étapes permettant la réalisation d'un processus données d'une manière modulaire, structurée et hiérarchique. Néanmoins, L'IDEF0 fournit une représentation statique du processus étudié et ne prend pas en considération certains aspects dynamique tels que les durées de réalisations des différentes tâches. A ce titre, nous avons vu que la méthode BPMN est dotée d'un formalisme graphique permettant de rendre compte de cet aspect temporel et d'autres considérations telles que certaines relations logiques entre les entrées et sorties. Ensuite, nous avons appliqué ces deux approches à un PII relatif à un scénario d'accident majeur au niveau d'une sphère de stockage

de gazoline (complexe GL1/K) : fuite de gazoline suivie d'explosion et de feu de cuvette. L'usage de l'IDEF0 nous a permis une description fine du déroulement des différentes étapes du PII. Puis, la mise en œuvre du formalisme BPMN a conduit à une modélisation plus réaliste qui non seulement intègre les différentes relations entre les tâches et activités à réaliser et les différents acteurs concernés, mais aussi les durées d'exécution. La simulation du BPMN, en utilisant le logiciel Bizagi, a conduit à l'estimation du temps total d'intervention : de la détection de la fuite jusqu'à l'extinction complète du feu. Cependant, l'inconvénient majeur de l'approche BPMN, dans notre approche de modélisation des PII, est son incapacité de prendre certains aspects dynamique tels que les probabilités de défaillances des équipements d'intervention et certaines relations logiques.

Enfin, au cours du quatrième chapitre, nous avons d'abord introduit brièvement le formalisme graphique des réseaux de Petri (RdP) et l'approche dite simulation de Monte Carlo en matière de principe et de procédure. Ensuite, nous avons mis en œuvre les RdPS afin de modéliser le déroulement du PII précédent, où nous avons décrit d'une manière détaillée ce déroulement, présenté les différents RdPS sous-jacents et les résultats obtenus par simulation Monte Carlo via le module Petri du logiciel GRIF. Les résultats obtenus en termes de probabilité d'occurrence de certains événements et des instants de leur occurrence montrent l'efficacité de la stratégie d'intervention.

En termes de perspectives de recherche, nous comptons développer une bibliothèque de modèles (pour différents scénarios d'accident) prêts à l'emploi par des gens non spécialistes des RdPS (protection civile, service intervention). En effet, ces modèles concernent le comportement de certains équipements (fonctionnement et défaillance), le processus de développement de certains événements (aggravation ou maîtrise de la situation), la communication entre différents acteurs,

Références

Références

- [1] : N.Chen,W.Liu, R.Bai, A.Chen. Application of computational intelligence technologies in emergency management: a literature review.Springer Nature 2017Artif Intell Rev DOI 10.1007/s10462-017-9589-8.
- [2] : H.George, DP.Coppola. Introduction to Emergency Management 5th Edition Bullock J (2013). Butterworth-Heinemann, Oxford, eBook ISBN: 9780124104051,Hardcover ISBN: 9780124077843 pp 2–5 Page Count: 440.
- [3] : Q.Chen, X.Chen, Q.Tang .evacuation risk assessment model for emergency traffic with consideration of urban hazard installations. (2009) Chin Sci Bull 54:1000–1006.
- [4] : D. E.Alexander. book. Principles of Emergency Planning and Management January 2002.
- [5] : D. E.Alexander. Principles of Emergency Planning and Management April 2003 Risk Management Article 2003 .pp 5(2):67-67 DOI: 10.1057/palgrave.rm.8240152.
- [6] : R.Mayer . A Cognitive Theory of Multimedia Learning: Implications for Design Principles article January 2005 pp91(2).
- [7] : T.Kanno, K.Furuta. Resilience of emergency response systems Conference paper January 2006
- [8] : Jackson, G. and Deeg, R. Comparing Capitalisms: Understanding Institutional Diversity and Its Implications for International Business. Journal of International Business Studies, article (2008) pp 39, 540-561. <http://dx.doi.org/10.1057/palgrave.jibs.8400375>.
- [9] : G-M.Karagiannis , E.Piatyszek, J-M.Flaus . Industrial emergency planning modeling: a first step toward a robustness analysis tool .article 2010 PMID: 20546993 DOI: 10.1016/j.jhazmat.2010.05.014.
- [10] : N.Chen,W.Liu, R.Bai, A.Chen. Application of computational intelligence technologies in emergency management: a literature review.Springer Nature 2017Artif Intell Rev DOI 10.1007/s10462-017-9589-8.
- [11] : H.George, DP.Coppola. Introduction to Emergency Management 5th Edition Bullock J (2013). Butterworth-Heinemann, Oxford, eBook ISBN: 9780124104051,Hardcover ISBN: 9780124077843 pp 2–5 Page Count: 440.
- [12] : Q.Chen, X.Chen, Q.Tang .evacuation risk assessment model for emergency traffic with consideration of urban hazard installations. (2009) Chin Sci Bull 54:1000–1006.
- [13] : A. Mkhida. Contribution à l'évaluation de la sûreté de fonctionnement des systèmes instrumentés de sécurité intégrant de l'intelligence. Automatique / Robotique. Institut National Polytechnique de Lorraine - INPL, 2008. Français.pp47-48.
- [14] : CEI 61508 Sécurité fonctionnelle des systèmes électriques/ électroniques/électroniques programmables relatifs à la sécurité – Partie 1: Prescriptions générales relatifs à la sécurité Commission Electrotechnique Internationale, Genève, Suisse,Première édition 2000.

- [15] : J. Gey, D. Courdeau, Pratiquer le management de la santé et de la sécurité au travail : Maîtriser et mettre en oeuvre l'OHSAS 18001, ISBN 2124750836, AFNOR Editions. 2005. Broché : 147 pages.
- [16] : L. Cottet, Gaydon. Plans d'urgence : plan d'opération interne (POI) et plan particulier d'intervention (PPI) Date de publication : 10 juil. 2013. Technique de l'ingénieur. <https://doi.org/10.51257/a-v1-g4217>.
- [17] : R. Gouriveau, Analyse des risques. Formalisation des connaissances et structuration des données pour l'intégration des outils d'étude et de décision, Thèse de Doctorat de l'INPT (Institut National Polytechnique de Toulouse) 2003.
- [18] : NF EN ISO 12100 Parties 1 et 2 : Sécurité des machines – Notions fondamentales, principes généraux de conception, janvier 2004.
- [19] : F. R. Farmer, Siting criteria - a new approach, in 'Symposium Containment and Siting of Nuclear Power Plants, International Atomic Energy Agency, Wieden'. 1967.
- [20] : ISO/CEI Guide 51. Aspects liés à la sécurité. Principes directeurs pour les inclure dans les normes. International Organisation for Standardization. 1999.
- [21] : A. Villemeur, Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels, Edition Eyrolles, Paris, 1988.
- [22] : J. C. Laprie, Sûreté de fonctionnement et tolérance aux fautes : concepts de base, rapport LAAS n°88.287, paru dans les techniques de l'ingénieur, 1988.
- [23] : Norme CEI 61511, Sécurité fonctionnelle - Systèmes instrumentés de sécurité pour le domaine de la production pour processus – Parties 3, juillet 2003. Commission Electrotechnique Internationale, Genève, Suisse.
- [24] : J. C. Laprie, Sûreté de fonctionnement et tolérance aux fautes : concepts de base, rapport LAAS n°88.287, paru dans les techniques de l'ingénieur, 1988.
- [25] : A. Villemeur, Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels, Edition Eyrolles, Paris, 1988.
- [26] : NASA. Risk Management Procedural Requirements, 2002. Revalidated 2/1/07.
- [27] : Kh. Negrichi. Approche intégrée pour l'analyse de risques et l'évaluation des performances: application aux services de stérilisation hospitalière. Autre. Université Grenoble Alpes, 2015. Français. pp15.
- [28] : Document d'information édité par le ministère de l'Écologie, du Développement et de l'Aménagement durables, direction de la Prévention des pollutions et des risques, service de l'Environnement industriel Conception et réalisation : Oréade Conseil [38420 Domène] Graphies [38240 Meylan], Septembre 2007.

- [29]: livre Advanced Sciences and Technologies for Security Applications, Franck_Guarnieri_· Emmanuel_Garbolino Editors, Safety Dynamics Evaluating Risk in Complex Industrial Systems ; <https://doi.org/10.1007/978-3-319-96259-7>.
- [30]: livre human factors methods for improving performance in the process industries ,Center for Chemical Process Safety, Dan Growl, Editor Authors: Dennis Attwood, Paul Baybutt, Chris Devlin, Walter Fluharty, Gareth Hughes, Dan Isaacson, Phil Joyner, 2007 by American Institute of Chemical Engineers 2007.
- [31] : Direction Centrale Sante, Sécurité & Environnement, 2007. Référentiel Système de Gestion des Urgences et des Crises, Standard Plan d'Organisation Interne POI. SONATRACH.
- [32] : A.Kaddoussi Optimisation des flux logistiques : vers une gestion avancée de la situation de crise. Thèse de doctorat, Ecole Centrale De Lille. 2012.
- [33] : Federal Emergency Management Agency, 2009. Developing and maintaining state, territorial, tribal and local government emergency plans, <http://www.fema.gov/about/divisions/cpg.shtm>.
- [34] : Ch.DJEDDI, Évaluation de la performance des plans internes d'intervention au moyen des réseaux de Petri, mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Hygiène & Sécurité industrielle ; Université El Hadj Lakhdar –Batna (Institut D'hygiène et Sécurité Industrielle) 2015.pp6-7.
- [35] : Direction de la Défense et de la Sécurité Civiles, 1985. Guide d'élaboration d'un Plan d'Opération Interne, ISBN : 2-905015-16-0.
- [36] : US National Response Team, 2001. Hazardous Materials Emergency Planning Guide, <http://www.nrt.org/Production/NRT/NRTWeb.nsf/PagesByLevelCat/Level3GeneralNRTPublications?Opendocument>.
- [37] : 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.
- [38] : Disaster preparedness, 2nd edition, United Nations Disaster Management Training Program. (DHA/UNDRO - DMTP - UNDP, 1994, 66 p).
- [39] : International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies, 2007. Disaster response and contingency planning guide.
- [40] : 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.
- [41] : Direction Centrale Sante, Sécurité & Environnement, 2007. Référentiel Système de Gestion des Urgences et des Crises, Standard Plan d'Organisation Interne POI. SONATRACH.
- [43] : Sonatrach RA2K EDD et Plan Interne d'Intervention PII, SONATRACH Activité LRP, N° Rév. 01 Date : Octobre 2017.

- [43]: E.Drais,M.Favaro,G.Aubertin.Les système de management de la santé –sécurité en entreprise : caractéristique et condition de mise en œuvre. Institut national de recherche et de sécurité pour la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles. NS 275,2008.
- [44]: ISO 14004 : Systèmes de management environnemental — Lignes directrices générales concernant les principes, les systèmes et les techniques de mise en œuvre. 2004.
- [45]: G.-M., Piatyszek, E., and Flaus, J.-M. Industrial emergency planning modeling : A first step toward a robustness analysis tool. *Journal of Hazardous Materials* 181, 1–3 (2010), 324 – 334.
- [46]: R.Boudreau, & L. Lapointe, (2018). *L'intervention interne : Une approche systémique*. Montréal : Presses de l'Université du Québec.
- [47]: J. P.Kotter, (2012). *Leading change*. Boston : Harvard Business Review Press.
- [48]: DET NORSKE VERITAS, 2011. Plan d'Intervention Interne (PII), Rapport N° EP002720 N° 6 – HRM Centre, SONATRACH.
- [49] : DN. VERITAS, Etude De Danger (EDD), Rapport N° EP002718 N°6-8 . SONATRACH DP HRM Centre. 2010.
- [50]: Conseil pour la Réduction des Accidents Industriels Majeurs, 2007. *Guide de gestion des risques d'accidents industriels majeurs*. Canada 2007.
- [51]: 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.
- [52]: M.Cédrick, . *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 , 2011.
- [53]: J.Larken, H.Shannon, , J.E.Strutt, , B.Jones. *Performance indicators for the assessment of emergency preparedness in major accident hazards*, U.K. Health and Safety Institute, ISBN: 07176 2038-7 ,2001.
- [54]: D.Lachtar, 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.
- [55]: B. Pavard, J. Dugdale, N.B. Saoud, S. Darcy, P. Salembier, *Design of robust sociotechnical systems*, 2nd Symposium on Resilience Engineering, Juan-les-Pins, France, 2006, <http://www.resilience-engineering.org/proceedings.htm>.
- [56]: T.W. Harding et al., *Management des risques majeurs: des disciplines à l'interdisciplinarité* (French), programme plurifacultaire du Rectorat MRM, Université de Genève, 2001.
- [57] : J.L. Wybo, *The role of simulation exercises in the assessment of robustness and resilience of private or public organizations*, in: H.S. Pasman, I.A. Kirillov (Eds.), *Resilience of Cities to Terrorist and other Threats*, Springer, 2008, pp. 491–507.

- [58]: G-M. Karagiannis, Eric Piatyszek, Jean-Marie Flaus, Industrial emergency planning modeling: A first step toward a robustness analysis tool, *Journal of Hazardous Materials* 181, 2010, pp 324-334.
- [59]: C. Ramsay, Protecting your business: from emergency planning to crisis management, *J. Hazard. Mater.* 65 (1999) 131–149.
- [60]: R.J. Heuer, *Psychology of Intelligence Analysis*, Center for the Study of Intelligence, U.S. Central Intelligence Agency, 1999.
- [61]: J.M. Flaus, A model-based approach for systematic risk analysis, *Proc. IMechE* 222 (2008) 79–93.
- [62]: F. Baiardi, C. Telmon, D. Sgandurra, Hierarchical, model-based risk management of critical infrastructures, *Rel. Eng. Syst. Saf.* 64 (2009) 1403–1415.
- [63]: Federal Emergency Management Agency, Developing and Maintaining State, Territorial, Tribal and Local Government Emergency Plans, *Comprehensive Preparedness Guide (CPG)*, vol. 101, 2009, http://www.fema.gov/pdf/about/divisions/npd/cpg_101_layout.pdf.
- [64]: Federal Emergency Management Agency, Guide for All-Hazard Emergency Operations Planning, State and Local Guide (SLG), vol. 101, 1996, <http://www.fema.gov/pdf/plan/slg101.pdf>.
- [65]: Direction de la Défense et de la Sécurité Civiles, Guide ORSEC Départemental – Méthode générale, Tome G.1, 2006 (French), <http://www.interieur.gouv.fr>.
- [66]: Direction de la Défense et de la Sécurité Civiles, Guide d'élaboration d'un Plan d'Opération Interne, Paris, 1985, ISBN: 2-905015r-r16-0 (French).
- [67]: Groupe d'Etudes de Sécurité des Industries Pétrolières et Chimiques, Guide méthodologique du GESIP pour l'élaboration du P.O.I. d'un site industriel, usine chimique, complexe pétrochimique – Rapport GESIP 96/01, 1996 (in French).
- [68]: Groupe d'Etudes de Sécurité des Industries Pétrolières et Chimiques, Guide méthodologique du GESIP pour l'élaboration du Plan d'Opération Interne d'un établissement de stockage de produits inflammables (dépôt) ou d'un petit établissement industriel – Rapport n° 96/02, 2001 (French).
- [69]: B. Jackson, The Problem of Measuring Emergency Preparedness—The Need for Assessing “Response Reliability” as Part of Homeland Security Planning, Rand Corporation, 2008, <http://www.rand.org>.
- [70]: D. Alexander, *Principles of Emergency Planning and Management*, Terra Publishing, 2002.
- [71]: H. Mayer, *First Responder Readiness: A systems approach to readiness assessment using model based vulnerability analysis techniques*, Master Thesis, Naval Postgraduate School, 2005.
- [72]: National Institute of Occupational Safety and Health (NIOSH). "Emergency Response Training: Guidelines for Planning, Developing, and Delivering Effective Training." 2012. University of Toronto. "The Impact of Training on the Performance of Emergency Responders." 2015. University of

Melbourne. "The Role of Attitude in Emergency Response." 2017.University of Harvard. "Motivation and Performance in Emergency Response." 2019.

[73]: P.Jacques. Méthode d'analyse fonctionnelle Description, application industrielle, 06 décembre 2018 ÉCOLE D'INGÉNIEURS DE FRIBOURG pp 6-7.

[74] : A.Khalaf. Systèmes de contrôle de la qualité de production : méthodologie de modélisation, de pilotage et d'optimisation des systèmes de production ,thèse de doctorat en vue de l'obtention du grade de docteur en génie industriel ; Université Paul Verlaine de Metz 2008.

[75] : J. Tailland, Instruments intelligents : Modèle et outils de conception, thèse de doctorant, Université de Savoie, 2000.

[76] : Ch. de Blandonnet. Technologies de l'information .Profil unifié pour DoDAF et MODAF (UPDM) de l'OMG, 2.1.1 Reference number ISO/IEC 19513 année 2017.

[77]: Business Process Modeling Notation (BPMN)", Version 1.0 - May 3, 2004. Disponible via <http://www.bpmn.org/>.

[78] : MN.Kholladi. Une Approche de transformation de la notation BPMN vers BPEL basée sur la transformation de graphe Mémoire de Magister en Informatique Option : Génie logiciel ,l'école doctorale de l'est 2009 pp4-6 .

[79] : Kholladi Mohamed Naoufel, Une Approche de transformation de la notation BPMN vers BPEL basée sur la transformation de graphe, Mémoire de Magister en Informatique Option : Génie logiciel Dans le cadre de l'école doctorale de l'est ; Université Mentouri Constantine 2008.

[80] : Direction Centrale Sante, Sécurité & Environnement, 2007. Référentiel Système de Gestion des Urgences et des Crises, Standard Plan d'Organisation Interne POI. SONATRACH..

[81] : Manuel d'opération, ICS Système de gestion des situations d'urgences et des crises, Groupe SONATRACH.

[82] :Edraw software : <https://www.edraw.com>

[83] : Bizagi software: <https://www.bizagi.com>

[84] : Gu, P.A. Bahri, A survey of Petri net applications in batch processes, Computers in Industry, 47, 99-111, 2002.

[85]: al.Sachdeva . Reliability analysis of pulping system using Petri nets September 2008 International Journal of Quality & Reliability Management 25(8):860 877 DOI:10.1108/02656710810898667.

[86] : R.David et H.Alla.livre Discrete, Continuous, and Hybrid Petri Nets.2010.

[87] : J-P.Signoret, Alain Leroy (2021), Reliability Assessment of Safety and Production Systems- Analysis, Modelling, Calculations and Case Studies ,Springer Nature, Switzerland.

[88] : Zio, E. The Monte Carlo Simulation Method for System Reliability and Risk Analysis, Springer-Verlag, Londres, Royaume-Uni. (2013) .

REFERENCES

- [89] : P.Lezard.Etudes des réseaux de Petri Stochastiques, DEAMathématique appliquées, Université de Paul SABATIER, 1995.
- [90] : R.DAVID, H.ALLA Discrete, Continuous, and Hybrid Petri Nets, département d'automatique, 38402Saint-Martin-d'Hères, DOI 10.1007/978-3-642-10669-9, PP 4-6.
- [91] : Y. Atamna. Réseaux de Petri Temporisés Stochastiques Classiques et Bien Formés. Définition, Analyse et Application aux Systèmes Distribuée Temps Réel, Thèse Doctorat en Informatique Industrielle, Université de Paul SABATIER, 1994.
- [92] : Innal, F., Hamzi, R., Djeddi, C., 2014. Handling uncertainty in emergency plan evaluation using generalized Petri Nets, The 1st International Conference on ICTs for Disaster Management ICT-DM'2014, DOI: 10.1109/ICTDM. 2014.6917783.
- [93] : GRIF, (2023) "Graphical interface for reliability forecasting software", site: <http://grif-workshop.fr>.