



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique

جامعة وهران 2 محمد بن أحمد  
Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed  
-----  
معهد الصيانة و الأمن الصناعي  
Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle

**Département de Sécurité Industrielle et Environnement**  
**MÉMOIRE**

Pour l'obtention du diplôme de Master

**Filière :** Sécurité Industrielle  
**Spécialité :** Sécurité, Intervention, Prévention

**Thème**

Approche Bayésienne pour la prévention des  
risques : application au centre de distribution  
NAFTAL de Tiaret

Présenté et soutenu publiquement par :

Nom : **AMRANE** Prénom : **Ahmed Cherif**

*et*

Nom : **LAIMECHE** Prénom : **Ilyes**

Devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
Mme HEBBAR Chafika	MCA	IMSI	Président
Mme AISSANI Nassima	MCA	IMSI	Encadreur
Mme SERAT Fatima Zohra	MAA	IMSI	Examineur
Mr GUETARNI Hadj Mohamed Islam	MAA	IMSI	Examineur

Année 2019/2020

# Remerciements

En premier lieu, je tiens à remercier mon DIEU, mon créateur pour m'avoir donné la force pour accomplir ce travail.

J'avais envie d'adresser mes sincères remerciements à **Mme AISSANI Nassima** pour sa grande disponibilité, ses orientations et conseils tout au long de la rédaction de ce mémoire.

Je tiens à remercier également, les membres du jury pour l'honneur qu'ils me font en acceptant de juger et d'évaluer mon travail.

J'adresse mes vifs remerciements à tout le personnel de la société NAFTAL centre carburant Tiaret en particulier

# *Dédicace*

*À la mémoire de ma Mère,*

*À tous les êtres chers dont leur soutien m'a été indispensable et qui attendent avec impatience ma réussite,*

*En espérant être à la hauteur de leurs attentes.*

## **Approche Bayésienne pour la prévention des risques**

### **Résumé**

La zone de stockage d'hydrocarbures et produits pétrolier est l'une des unités de distributions où les scénarios les plus catastrophiques sont omniprésents. A cet effet, il est primordial d'être conscient de les scénarios à risque existant et d'implémenter des barrières de sécurité préventives et d'intervention avec un haut niveau de fiabilité, disponibilité, maintenabilité et de sécurité suite à des analyses quantitatives approfondies sur les risques, afin de garantir une totale maîtrise de ces zones, et réduire la gravité et la fréquence d'occurrence de ces scénarios catastrophiques. Cette mémoire a tiré profit des principes de la sûreté de fonctionnement, quelques méthodes d'analyse qualitative ainsi que les différentes méthodes d'Analyse Quantitative des Risques. Après avoir établi un état de l'art sur l'application des Réseaux bayésiens comme étant un outil d'aide à la décision performant et dynamique dans l'analyse Quantitative, afin de mettre en évidence ce travail de recherche une application sur l'installation de bac de stockage d'hydrocarbure, a été étudiée en passant par la modélisation et simulation par les différentes méthodes d'analyse et modèles probabilistes tel que : Arbre de défaillance, les coupes minimales et les facteurs d'importance probabilistes, Inférence bayésienne.

A la fin de ce travail un Réseau Bayésien a été élaboré à partir de l'AdD pour définir l'interaction entre la criticité des événements et leurs impacts sur l'indisponibilité du système. Ce Réseau Bayésien a été utilisé comme étant un outil d'aide à la décision pour la prévention contre le risque d'incendie/explosion de l'installation étudiée.

**Mots clés :** Analyse Quantitative des Risques, SDF, AdD, Réseaux Bayésien, Inférence bayésienne, Facteurs d'importance, bac de stockage d'hydrocarbure, risque d'incendie/explosion, Aide à la décision.

### **Bayesian approach to risk prevention**

### **Abstract**

The storage area of hydrocarbons and petroleum products is one of the distribution units where the most catastrophic scenarios are omnipresent. To this end, it is essential to be aware of the existing risk scenarios and to implement preventive and intervention security barriers with a high level of reliability, availability, maintainability and security following in-depth quantitative risk analyses, in order to guarantee total control of these areas, and reduce the severity and frequency of occurrence of these catastrophic scenarios. This thesis took advantage of the principles of operational safety, some methods of qualitative analysis as well as the different methods of Quantitative Risk Analysis. After establishing a state of the art on the application of Bayesian networks as a tool of efficient and dynamic decision support in Quantitative analysis, in order to highlight this work an application on the installation of hydrocarbon storage tank, was studied through modeling and simulation by the different methods of analysis and probabilistic models such as: failure tree analysis, minimum cuts and probabilistic importance factors, Bayesian inference.

At the end of this work a Bayesian network was developed from the FTA to define the interaction between the criticality of events and their impacts on the unavailability of the system. This Bayesian network was used as a decision support tool for fire/explosion risk prevention of the facility being studied.

**Keywords:** Quantitative Risk Analysis, FMEA, FTA, Bayesian Networks, Bayesian Inference, Factors of importance, hydrocarbon storage tank, risk of fire / explosion, Decision support.

## نهج النظرية الافتراضية (نظرية بايزي) للوقاية من المخاطر

### الملخص:

تعد منطقة تخزين الهيدروكربونات والمنتجات البترولية واحدة من وحدات التوزيع حيث توجد أكثر السيناريوهات كارثية في كل مكان. و لذلك ، من الضروري ان نكون على دراية بالسيناريوهات الخطرة القائمة و إقامة الحواجز الأمنية الوقائية والتدخل بمستوى عال من الموثوقية والتوافر وقابلية الصيانة والأمن بعد إجراء تحليلات كمية متعمقة للمخاطر ، من أجل ضمان السيطرة الكاملة على هذه المناطق ، والحد من شدة وتواتر حدوث هذه السيناريوهات الكارثية. تمثل هذه الأطروحة ، وبعض طرق استفاضة نظرية حول مبادئ الاعتمادية وقوانين الاحتمال وكذلك الطرق المختلفة لتحليل المخاطر الكمية التحليل النوعي بالإضافة إلى الطرق المختلفة لتحليل المخاطر الكمية. بعد مراجعة أدبية في الأبحاث سابقة عن تطبيق شبكات النظرية الافتراضية باعتبارها أداة دعم القرار قوية وديناميكية في التحليل الكمي، من أجل تسليط الضوء على هذا العمل البحثي تم التطبيق على نظام تخزين الهيدروكربون، تمت دراسته من خلال النمذجة والمحاكاة بطرق مختلفة للتحليل والنماذج الاحتمالية مثل: شجرة تحليل الخطأ، والحد الأدنى من التخفيضات وعوامل الاحتمالية ذات أهمية، والاستدلال النظري. في نهاية هذا العمل، تم تطوير شبكة النظرية الافتراضية (شبكة بايزي)، لتحديد التفاعل بين أهم الأحداث وتسببها في وقوع حادث و عدم توفر النظام. تم استخدام هذه الشبكة النظرية الافتراضية كأداة لدعم القرار للوقاية من مخاطر الحريق / الانفجار في المرفق قيد الدراسة.

**الكلمات المفتاحية:** تحليل المخاطر الكمية، وضع الفشل وتحليل التأثيرات، شجرة تحليل الخطأ، شبكات النظرية الافتراضية ، والاستدلال النظرية الافتراضية ، والعوامل ذات الأهمية ، خزان الهيدروكربون ، خطر الحريق / الانفجار ، ودعم القرار

# Acronymes

AdD : Arbre de défaillance

AMDEC : Analyse des modes de défaillance et de leurs effets

AQR : Analyse quantitative des risques

CdM : Chaînes de Markov

C.C.C : Causes - Conséquences - Compensations

FDMS : Fiabilité, disponibilité, maintenabilité et sécurité

FIP : Facteur d'importance probabiliste

HAZOP : hazard and operability

MC simulation : Simulation de Monte Carlo

MDT : Durée moyenne d'indisponibilité (Mean Dawn Time)

MTBF : Durée moyenne entre deux défaillances consécutives d'une entité réparée. (Mean Time Between Failure)

MTTF : Durée moyenne de fonctionnement avant la première défaillance (Mean Time To Failure)

MTTR : Durée moyenne de réparation (Mean Time To Repair)

MUT : Durée moyenne de fonctionnement après réparation (Mean Up Time)

RB : Réseau Bayésien

RdP : Réseau de Pétri

REX : Retour d'expérience

FERS : feu et l'explosion de réservoir de stockage

SdF : Sûreté de fonctionnement

TPC : Table de probabilités conditionnelles

R(t) : Reliability, Fiabilité dépendant du temps  $t$

$\lambda$  (lambda) : Taux de défaillance constant.

EB : Evènements basiques

EI : Evènements intermédiaires

ER : Evènement redouté

X<sub>n</sub> : Distribution d'entrée d'un système

P [X = 1] : La probabilité que X soit en état de fonctionnement

P [X = 0] : La probabilité que X soit en état de défaillance

$\theta$  : Ensemble des probabilités de chaque nœud conditionnellement à l'état de ses parents(racine)

Poc : Probabilité d'occurrence

SONATRACH : Société nationale de transport par canalisation des hydrocarbures

ISO : International Organization for Standardization

SONELGAZ : Société nationale de l'électricité et du gaz

NAFTAL : société algérienne responsable de la distribution et la commercialisation des produits pétroliers

# Glossaire

Selon la norme CEI 61508 [IEC 02] et AFNOR [AFN 88] :

## Systeme :

Ensemble d'éléments qui interagissent selon un modèle précis, un élément pouvant être un autre système, appelé sous-système, les sous-systèmes pouvant être eux-mêmes soit un système de commande soit un système commandé composé de matériel, des composants.

## Sous-système :

Ensemble de composant (mécanique, électromécanique, électronique, ...).

## Composant :

Un composant est une partie d'un système (matériels ou évènements), non décomposable dans le cadre de l'étude, et pour laquelle on dispose d'informations qualitatives (conditions de fonctionnement, modes de défaillance, ...) et quantitatives (fréquences d'apparitions des pannes, durées de bon fonctionnement, ...) suffisantes. Le type de composants, leurs quantités, leur qualité et leur manière dont ils sont disposés ont un effet direct sur la fiabilité du système.

## Sûreté de fonctionnement :

La sûreté de fonctionnement est l'aptitude d'une entité à satisfaire une ou plusieurs fonctions requises dans des conditions données. La sûreté de fonctionnement se caractérise généralement par les paramètres suivants : Fiabilité, Maintenabilité, Disponibilité et Sécurité. On retrouve dans les initiales de ces concepts, le nom de FMDS parfois donné à la sûreté de fonctionnement.

## Fiabilité : R(t)

Aptitude d'une entité à accomplir une fonction requise, dans des conditions données, pendant une durée donnée.

## Disponibilité : A(t)

La disponibilité d'une entité est la probabilité qu'elle accomplisse les fonctions requises dans des conditions données et a un instant donné. Le système peut avoir été réparé dans le passé.

## Maintenabilité : M(t)

Dans des conditions données d'utilisation pour lesquelles il a été conçu, aptitude d'un bien à être maintenu ou rétabli dans un état dans lequel il peut accomplir une fonction requise, lorsque la maintenance est accomplie dans des conditions données, avec des procédures et des moyens prescrits.

## Maintenance :

Ensemble des actions permettant de maintenir ou de rétablir une entité dans un état spécifié ou en mesure d'assurer un service déterminé.

## Sécurité :

La sécurité est une aptitude d'une entité à éviter de faire apparaître, dans des conditions données, des évènements critiques ou catastrophiques.

## Défaillance :

Cessation de l'aptitude d'une unité fonctionnelle à accomplir une fonction requise. Une défaillance est un passage d'un état à un autre, par opposition à une panne qui est un état. On entend par "unité fonctionnelle" soit un système complet, soit l'un quelconque de ses éléments.

# Glossaire

## Taux de défaillance :

C'est la probabilité pour que le système soit défaillant, cette définition s'applique pour tout type d'éléments (système, sous-système, composant).



<b>Remerciement</b>	
<b>Dédicace</b>	
<b>Acronymes</b>	
<b>Glossaire</b>	
<b>Tableau des matières.....</b>	<b>I</b>
<b>Liste des figures .....</b>	<b>II</b>
<b>Liste des tableaux .....</b>	<b>III</b>
<b>Introduction générale .....</b>	<b>01</b>
<b>Chapitre I : La sûreté de fonctionnement et la prévention des risques</b>	
<b>I-1- Introduction .....</b>	<b>03</b>
<b>I-2- Qu'est-ce que la sûreté de fonctionnement ? .....</b>	<b>03</b>
<b>I-3- Bref historique.....</b>	<b>04</b>
<b>I-4- Pourquoi faire une analyse de risque ? .....</b>	<b>05</b>
<b>I-5 -L'analyse du risque .....</b>	<b>06</b>
<b>I-6- Objectifs – intérêts des méthodes d'analyse de risques .....</b>	<b>07</b>
<b>I-7 - Résultats attendus .....</b>	<b>09</b>
<b>I-8- Méthodes d'analyse de sûreté de fonctionnement .....</b>	<b>10</b>
<b>I-9- Les Méthodes En Revue .....</b>	<b>11</b>
<b>I-9- 1- HAZOP (HAZARD AND OPERABILITY STUDY) ou Etude de Sécurité sur schémas de circulation des fluides .....</b>	<b>11</b>
<b>1 – Objectif .....</b>	<b>11</b>
<b>2 - Mise en œuvre de la méthode .....</b>	<b>11</b>
<b>3 - Constitution de l'équipe pluridisciplinaire.....</b>	<b>12</b>
<b>4 - Paramètres de fonctionnement.....</b>	<b>12</b>
<b>5 - Déviations - Mots clés.....</b>	<b>13</b>
<b>6 - Déroulement de la méthode HAZOP .....</b>	<b>14</b>
<b>7 - Intérêt et L imites de la Méthode .....</b>	<b>15</b>
<b>I-9- 2- Méthode C.C.C. (Causes - Conséquences - Compensations) .....</b>	<b>15</b>
<b>1 – Objectif .....</b>	<b>15</b>
<b>2 - Mise en œuvre de la méthode .....</b>	<b>15</b>
<b>3 - Intérêt et L imites de la Méthode .....</b>	<b>15</b>
<b>I-9- 3- Analyse des modes de défaillance, de leurs effets et de leur criticité (AMDEC) .</b>	<b>16</b>
<b>1 – Objectif .....</b>	<b>16</b>
<b>2 - Mise en œuvre de la méthode .....</b>	<b>16</b>
<b>3 - Intérêt et L imites de la Méthode .....</b>	<b>16</b>
<b>I-9- 4- Arbre de défaillances (ADD) .....</b>	<b>17</b>
<b>1 – Objectif .....</b>	<b>17</b>

2 - Mise en œuvre de la méthode .....	17
3 - Symbolisme simplifié .....	18
I-5-Conclusion .....	19
<b>Chapitre II : Les approches quantitatives pour la sûreté de fonctionnement</b>	
II.1 Introduction .....	20
II-2-Approches quantitatives .....	20
II-2-1-Données d'entrée .....	20
II-2-2-Avantages et limites .....	20
II-3-A-Etudes Probabilistes de Sûreté (EPS) .....	21
1-Objectif .....	21
2-L'EPS vise à .....	21
II-3-B -Aspects Bayésiennes généraux .....	22
II-3-B -1-Théorème de Bayes .....	22
II-3-B -2- l'approche bayésienne vs l'approche classique .....	23
II-3-B -3-Le déroulement de l'approche bayésienne .....	23
II-3-B -4-Le principe et la fonction de vraisemblance .....	24
II-3-C-Intégration Monte-Carlo .....	25
II-2-C-1- Méthode de Monte-Carlo .....	26
II-2-C-1-1- Échantillonnage probabiliste .....	26
II-2-C-1-2- Intégration .....	27
II-2-C-1-3- Analyse des incertitudes .....	27
II-3-D-Processus de Markov .....	28
1-Objectif .....	28
2-Construction d'un modèle .....	29
3-Intérêts et limites .....	29
II-3-E-Méthode Bloc Diagramme de Fiabilité (BDF) .....	30
1-Objectif .....	30
2- Démarche .....	30
3-Intérêts et limites .....	32
II-3-F-Réseau de Pétri.....	32
1-Objectif .....	32
2- Démarche .....	33
3-Intérêts et limites .....	34
II-4- Conclusion .....	34
<b>Chapitre III : L'étude de cas</b>	
III -1- Introduction .....	35
III -2- Définition de la société NAFTAL .....	35
III -2-2- Activité .....	36
III -2-3- Infrastructures .....	36

<b>III -2-4- Produits et services</b> .....	<b>37</b>
<b>III -2-5- Environnement</b> .....	<b>37</b>
<b>III -2-6- Objectifs</b> .....	<b>38</b>
<b>III -2-7- La macrostructures de NAFTAL</b> .....	<b>38</b>
<b>III -3- Centre 1147 Tiaret</b> .....	<b>40</b>
<b>III -3-1- Installation</b> .....	<b>40</b>
<b>a- Pompes carburants</b> .....	<b>40</b>
<b>b-Poste de chargement des camions</b> .....	<b>40</b>
<b>c- Poste de déchargement des camions</b> .....	<b>40</b>
<b>d- Réseau anti-incendie</b> .....	<b>40</b>
<b>e- Réseau électrique</b> .....	<b>41</b>
<b>III -4- Situation géographique</b> .....	<b>41</b>
<b>III -5-Fiche technique du centre 1147 Tiaret (BRANCHE CARBURANTS DISTRICT CBR TIARET)</b> .....	<b>42</b>
<b>III -6- Bacs à Toit Fixe</b> .....	<b>45</b>
<b>III-6-1 -Principaux élément constitutifs</b> .....	<b>47</b>
<b>III-7-Cas étudié</b> .....	<b>48</b>
<b>III-7-1-Identification des Systèmes à étudier</b> .....	<b>48</b>
<b>III-7-2- Construction de l'arbre de défaillance pour le feu et l'explosion de réservoir de stockage d'hydrocarbure</b> .....	<b>48</b>
<b>III -8- Analyse de l'ADD</b> .....	<b>52</b>
<b>III -8-1- Coupes minimales et leurs importances</b> .....	<b>56</b>
<b>III -8-2- Facteurs d'importances probabilistes</b> .....	<b>56</b>
<b>III- 10- Conclusion</b> .....	<b>57</b>

#### Chapitre IV : Analyse des données et inférence bayésienne

<b>IV -1- Introduction</b> .....	<b>58</b>
<b>IV-2-Réseaux bayésiens RB</b> .....	<b>58</b>
<b>IV-3-Etapes de modélisation d'un réseau bayésien</b> .....	<b>60</b>
<b>IV-4-Le mécanisme d'inférence</b> .....	<b>60</b>
<b>IV-5-Difficultés dans l'utilisation des réseaux bayésiens</b> .....	<b>61</b>
<b>IV-6-Interprétation de Add en RB</b> .....	<b>62</b>
<b>IV-7-Présentation de AgenaRisk</b> .....	<b>64</b>

<b>IV-7-A-Domaine d'utilisation .....</b>	<b>64</b>
<b>IV-7-A-1-Secteur de l'industrie .....</b>	<b>64</b>
<b>IV-7-A-2-Le mode d'utilisation d'AgenaRisk .....</b>	<b>65</b>
<b>IV-8-Comment remplir les probabilités les EB dans le RB .....</b>	<b>66</b>
<b>IV-8-A-Structure du RB à partir de l'Add .....</b>	<b>67</b>
<b>IV-8-B- Analyse de réseau .....</b>	<b>70</b>
<b>IV-8-B-1- premier scénario « les feux de débordement au sol » .....</b>	<b>70</b>
<b>IV-8-B-2- Deuxième scénario « les feux de vent » .....</b>	<b>71</b>
<b>IV-8-B-3-troisième scénario « Incendies de joint de jante » .....</b>	<b>71</b>
<b>IV-9- conclusion.....</b>	<b>72</b>
<b>Conclusion générale .....</b>	<b>73</b>
<b>Références bibliographiques .....</b>	<b>74</b>

## Liste des figures

<b>Figure I.1 :</b> Arbre de la sûreté de fonctionnement .....	3
<b>Figure I.2 :</b> Évolution du taux de défaillance au cours du temps : courbe en baignoire .....	4
<b>Figure I.3 :</b> L'analyse du risque .....	8
<b>Figure I.4:</b> Déroulement de la méthode HAZOP .....	14
<b>Figure I.5 :</b> Symbolisme d'ADD .....	18
<b>Figure II.1 :</b> Exemple élémentaire de chaîne de Markov, à deux états A et E.....	28
<b>Figure II.2 :</b> Exemple de diagramme de fiabilité en série .....	30
<b>Figure II.3:</b> Exemple de diagramme de fiabilité en parallèle. ....	31
<b>Figure II.4:</b> Réseau de Pétri. ....	33
<b>Figure. III.1 :</b> Organigramme de la société NAFTAL .....	39
<b>Figure. III.2 :</b> Le Centre de Tiaret la zone industrielle ZAAROURA Tiaert .....	42
<b>Figure. III.3 :</b> les 08 bacs de stockage du centre 1147 Tiaret .....	45
<b>Figure. III.4 :</b> Réservoirs à toit fixe .....	46
<b>Figure. III.5 :</b> Toits fixes autoportants .....	46
<b>Figure. III.6 :</b> Toit conique supporté .....	47
<b>Figure. III.7 :</b> indicateur de niveau .....	48
<b>Figure. III .8:</b> L'arbre de défaillance Incendie et explosion du réservoir de stockage.....	50
<b>Figure. III.9 :</b> Graphe d'indisponibilité du système .....	52
<b>Figure. III.10:</b> Graphe d'indisponibilité du système (2) .....	53
<b>Figure. III.11 :</b> Graphe d'indisponibilité du système de télé-jaugeage à 1000h ensuite à 17520h.....	54
<b>Figure. III.12:</b> Graphe d'indisponibilité et d'infiabilité du système de vannes.....	55
<b>Figure. III.13 :</b> Graphe d'indisponibilité et d'infiabilité du système (3) .....	56
<b>Figure IV.1:</b> Exemple d'un réseau bayésien.....	59
<b>Figure IV.2 :</b> Le mécanisme d'inférence bayésienne .....	61
<b>Figure IV.3 :</b> montre la procédure simplifiée de passage d'Add à RB .....	62
<b>Figure IV.4 :</b> Exemple de Structure d'Add .....	63
<b>Figure IV.5 :</b> Structure du réseau bayésien .....	63
<b>Figure IV.6:</b> exemple d'un réseau bayésien présenté sur AgenaRisk .....	65
<b>Figure IV.7:</b> l'accès aux propriétés des nœud sur AgenaRisk.....	66
<b>Figure IV.8:</b> Tableau des probabilités à priori des nœuds parant sur .....	67

<b>Figure IV.9 :</b> Structure du réseau bayésien de feu et l'explosion de réservoir d'hydrocarbure, .....	68
<b>Figure IV.10 :</b> TPC du l'événement redouté.....	69
<b>Figure IV. 11 :</b> graph de risque démontre les valeurs de Poc de du ER, R1 et R2. ....	69
<b>Figure IV. 12 :</b> la cause « le feu de débordement » est la plus probable avec une probabilité de 98.507%. ....	70
<b>Figure IV. 13 :</b> la cause « le feu de ventilation » est la moins probable avec une probabilité de 6.062%. ....	71
<b>Figure IV. 14 :</b> la cause « incendie de joints de jante » avec une probabilité de 91.919% .....	71

## Liste des tableaux

<b>Tableau I.1:</b> un bref historique de la sûreté de fonctionnement .....	4
<b>Tableau I.2:</b> Réduction du risque à la source (la prévention et la protection) .....	9
<b>Tableau I.3:</b> Déviations - Mots clés de la méthode HAZOP .....	13
<b>Tableau II.1:</b> Avantages et limites des approches quantitatives (Probabilistes) .....	20
<b>Tableau III.1 :</b> Les pompes du centre de NAFTAL. ....	40
<b>Tableau III. 2 :</b> Tous les événements de l'arbre de défaillance .....	51
<b>Tableau. III.3 :</b> coupes minimales contribuent dans l'événement redouté à $t = 17520$ h avec exemple .....	56
<b>Tableau. III.4 :</b> Les facteurs d'importances contribuent dans l'événement redouté avec la grande coupe minimale dans chaque ordre et sa probabilité à $t = 17520$ h.....	56
<b>Tableau IV.1 :</b> TPC de la porte logique « Ou » .....	64
<b>Tableau IV.2 :</b> TPC de la porte logique « et » .....	64
<b>Tableau IV.3 :</b> Exemple de Tableau des probabilités à priori .....	66

### Introduction générale :

La sécurité dans toute entreprise est à la fois une nécessité, un objectif et aussi un état d'esprit. Les installations de stockage d'hydrocarbures sont des zones à haut risque. Elles traitent et stockent des grands volumes de produits liquides et gazeux qui sont inflammables, explosifs et toxiques. Car les accidents étaient, et encore l'une des principales raisons du nombre croissant de blessures et de décès, avec la libération de produits pétroliers peut conduire à de nombreux dangers, où une fuite en présence de la source d'ignition peut causer un incendie ou une explosion dans un environnement dangereux évolutif.

Les bacs de stockages sont les principaux moyens de stockage des hydrocarbures, dans les centres de distribution avant la commercialisations et distribution de ces derniers.

La zone de stockage du dérivé de pétrole (essence, gasoil...) avec ces installations est l'une des zones où les scénarios catastrophiques (les incendies, les phénomènes de BLEVE (vaporisation violente à caractère explosif), explosions, ainsi que les effets domino) sont plus fréquents à cause de la présence des substances inflammables.

Pour maintenir la compétitivité et la capacité de survie sur le marché, les entreprises doivent adopter la meilleure et la plus efficace approche pour évaluer l'intégrité de leurs actifs de façon opportune et structurée en utilisant les meilleurs outils disponibles. Les entreprises doivent s'efforcer de maintenir une performance optimale de leurs actifs et minimiser les conséquences de leurs défaillances. Parmi les infrastructures industrielles les plus importantes figurent les systèmes de stockages et distributions des hydrocarbures. Les conditions de ces systèmes doivent faire l'objet d'un suivi régulier afin de garantir leur intégrité et de préserver l'environnement.

Plusieurs points de ventes et distributions existent sur le territoire national, nous nous intéressons à un en particulier du Centre NAFTAL 1147- ZAAROURA de TIARET il est constitué de Pompes carburants - Poste de chargement des camions- Poste de déchargement des camions - Réseau anti-incendie – La zone de stockage : 08 à toit fixe et 06 à toit flottant...



Dans ce projet, nous présenterons une analyse d'un équipement qui est les bacs à toit fixe car sont des zones à haut risque à cause de la présence des substances inflammables et cette zone sera le cœur battant de ce centre.

Pour ce faire, nous utiliserons l'AdD pour l'identification d'un événement redouté (dans notre cas incendies/explosions) et faire l'analyse d'évènements de base capable de contribuer à l'occurrence de se événement redouté, après en établir le réseau bayésien à partir de l'AdD pour faire une simulation des scénarios.

Ce mémoire est organisé comme suit :

Chapitre I : Nous aborderons dans ce chapitre et dans le cadre de notre étude, les différents concepts de la sûreté de fonctionnement et les différents types d'analyse des risques des systèmes en vue d'améliorer leurs fiabilités et leurs sécurités.

Chapitre II : Ce chapitre sera consacré à une présentation des différents approches quantitatives pour la sûreté de fonctionnement et leurs principes.

Chapitre III : Ce chapitre considéré comme une étude de cas. Est consacré à la description du Centre de distributions NAFTAL 1147- ZAAROURA de TIARET, Nous essayons dans cette étude de concentrer la lumière sur les façons de développer une méthode pour l'évaluation des risques de feu et d'explosion des bacs. Les causes de ces dernières et leurs conséquences sont analysées au moyen des méthodes d'arbre de défaillance.

Chapitre IV : Dans ce chapitre l'application de la méthode proposée porte sur l'analyse des risques bacs de stockages à toit fixe. Nous essayons dans cette étude à partir de la méthode d'arbre de défaillance, une analyse quantitative mettant en œuvre les réseaux bayésiens est utilisée pour estimer la probabilité de survenue de l'événement redouté.

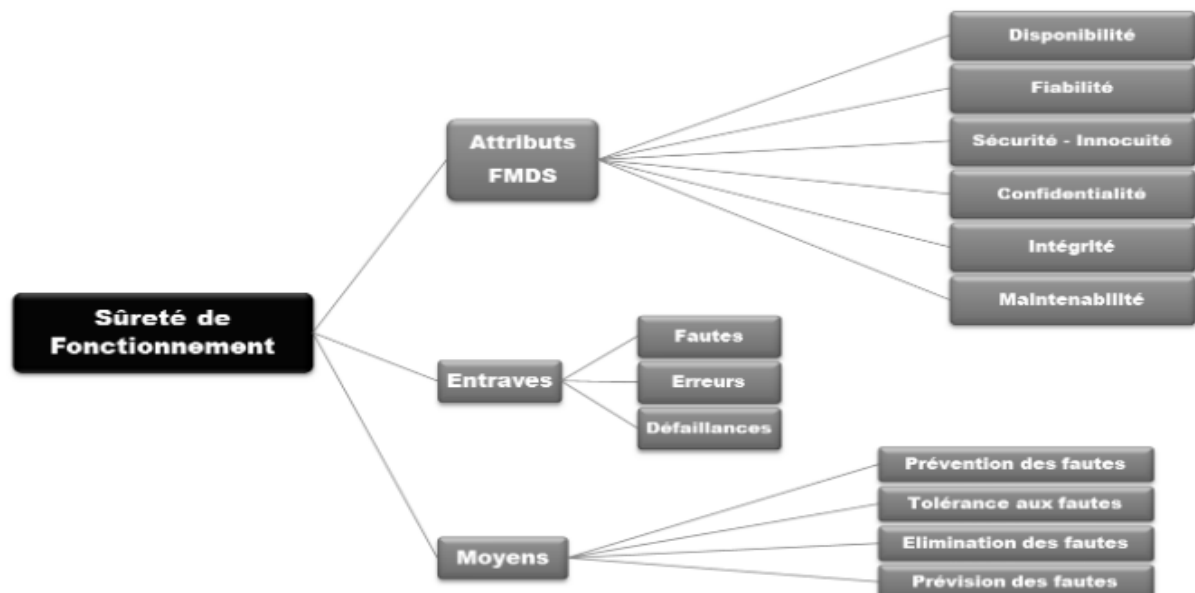
## I-1- Introduction :

Ce premier chapitre du mémoire introduit la sûreté de fonctionnement et la prévention des risques et pourquoi en fait l'analyse de risque. Nous présenterons les différents concepts et définitions utiles dans la sûreté de fonctionnement, des systèmes, et les différentes bases associées comme la fiabilité, la disponibilité, la maintenabilité, le taux de défaillance....

Aussi, nous parlerons de l'analyse de risque son intérêt et pourquoi nous menons une telle analyse, en plus nous décrivons quelques méthodes qualitatives les plus connues son objectif, la mise en œuvre de cette méthode, et les intérêts et limites de chaque méthode.

## I-2- Qu'est-ce que la sûreté de fonctionnement ?

La sûreté de fonctionnement est souvent appelée la science des défaillances ; elle inclut leur connaissance, leur évaluation, leur prévision, leur mesure et leur maîtrise. Il s'agit d'un domaine transverse qui nécessite une connaissance globale du système comme les conditions d'utilisation, les risques extérieurs, les architectures fonctionnelle et matérielle, la structure et fatigue des matériaux. Beaucoup d'avancées sont le fruit du retour d'expérience et des rapports d'analyse d'accidents. ("cours.pdf," n.d.)



- Figure I.1 : Arbre de la sûreté de fonctionnement (Moïsiso, 2016)-

Les attributs FMDS sont définis de la façon suivante :

**Fiabilité** : probabilité que le système soit non défaillant sur  $[0, t]$

**Maintenabilité** : probabilité que le système soit réparé sur  $[0, t]$

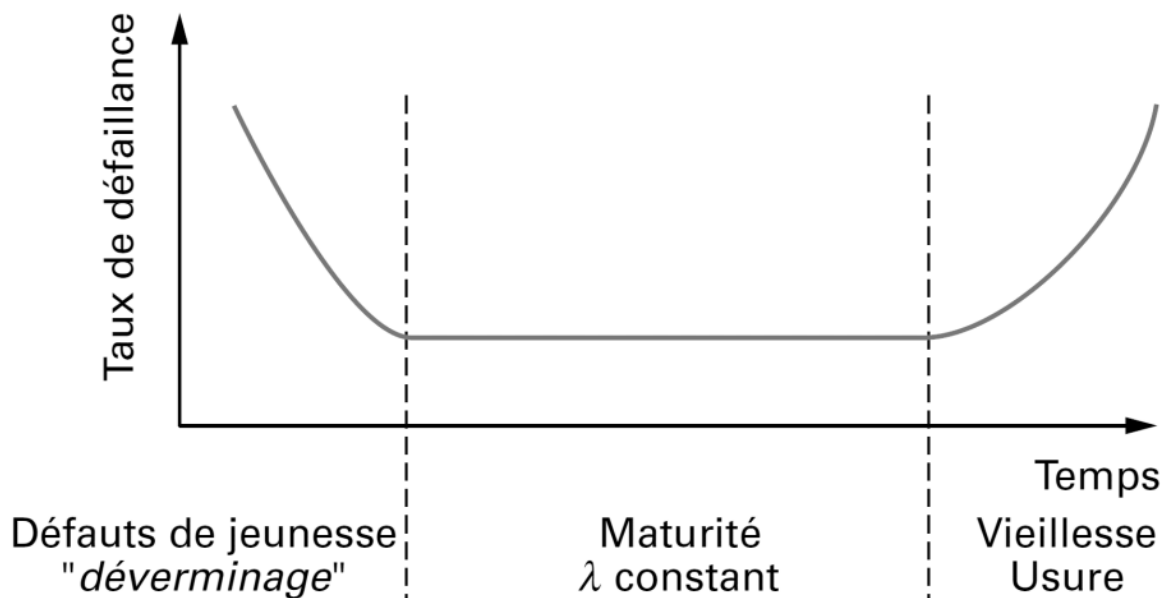
**Disponibilité** : probabilité que le système fonctionne à l'instant  $t$

**Sécurité** : probabilité d'éviter un évènement catastrophique

**Taux de défaillance  $\lambda(t)$**  :

Généralement, la probabilité de défaillance d'un composant dépend principalement de l'âge du composant. Cet âge est un taux horaire (homogène à l'inverse d'un temps) représentant la probabilité que le composant tombe en panne entre  $t$  et  $(t+dt)$ , sachant qu'il a fonctionné de  $0$  à  $t$ . Il est défini de la manière suivante (en appelant les probabilités  $P$ ) :

$$\lambda(t) = -\frac{1}{R(t)} \cdot \frac{dR(t)}{dt}$$



- Figure I.2 : Évolution du taux de défaillance au cours du temps : courbe en baignoire -

### I-3- Bref historique :

Le tableau ci-dessous présente un bref historique de la sûreté de fonctionnement.

Période	Accidents
<p><b>Jusqu'aux années 30 :</b>                      Approche intuitive : renforcer l'élément le plus faible                      Premiers systèmes parallèles et redondants                      Approche statistique, taux de défaillance                      Premières estimation de probabilité d'accidents d'avion                      Pugsley: premier objective de safety                      Taux d'accident d'avion <math>\leq 10^{-5}</math> per flight hour</p>	<p>Explosion poudrière (1794)                      Accident chemin de fer (1842)                      Titanic (1912) . . .</p>

<b>Années 40 :</b> Analyse des missiles allemands V1 (Robert Lusser) Loi de Murphy "If anything can go wrong, it will" Quantification de la disponibilité	
<b>Années 50 :</b> Advisory Group on Reliability of Electronic Equipment (AGREE) - Réduction des coûts de maintenance - Augmentation de la fiabilité - MTBF	Tcheliabinsk 40 (1957)
<b>Années 60 :</b> Analyses des modes de défaillance et de leurs effets Programmes de recherche spatiaux Arbre de défaillance (missile Minuteman) Arbres des causes (Boeing - NASA) Livres sur la fiabilité (ex. Barlow and Proschan)	Torrey Canyon (1967)
<b>Années 70 :</b> Analyse des risques Collecte de données REX	
<b>Années 80`à nos jours</b> Nouvelles techniques (simulation, réseaux de Petri,) Modélisation	Tchernobyl (1986) Ariane V (1996) DART (NASA, 2005) Vol Rio Janeiro. . .

-**Tableau I.1:** un bref historique de la sûreté de fonctionnement("cours.pdf," n.d.) –

## I-4- Pourquoi faire une analyse de risque ?

Dans l'industrie on fait face au fait de devoir de prendre des décisions tout le temps où le résultat est incertain. La compréhension de l'incertitude peut nous aider à prendre une beaucoup meilleure décision.

Nous pouvons penser à deux formes d'incertitude auxquelles nous devons faire face dans l'analyse des risques. Le premier est un sentiment général que la quantité que nous essayons d'estimer comporte une certaine incertitude. Ensuite, nous avons des événements à risque, qui sont des événements aléatoires qui peuvent ou non se produire et pour lesquels il y a un impact qui nous intéresse. Nous pouvons distinguer deux types d'événements :

- Un *RISQUE* est un événement aléatoire qui peut éventuellement se produire et, s'il se produisait, aurait un impact négatif sur les objectifs de l'organisation. Ainsi, un risque est composé de trois éléments : le scénario ; sa probabilité d'occurrence ; et l'ampleur de son impact s'il se produisait (soit une valeur fixe, soit une distribution).

- Une *OPPORTUNITE* est également un événement aléatoire qui peut éventuellement se produire mais, s'il se produisait, aurait un impact positif sur les objectifs de l'organisation. Ainsi, une opportunité est composée des trois mêmes des éléments comme un risque.(Vose, 2008)

## **I-5 -L'analyse du risque :**

L'analyse du risque a pour but de comprendre la nature du risque et ses caractéristiques, y compris le niveau de risque, le cas échéant. L'analyse du risque implique la prise en compte détaillée des incertitudes, des sources de risque, des conséquences, de la vraisemblance, des événements, des scénarios, des moyens de maîtrise et de leur efficacité. Un événement peut avoir des causes et conséquences multiples et affecter des objectifs multiples.

L'analyse du risque peut être menée à différents niveaux de détail et de complexité selon la finalité de l'analyse, la disponibilité et la fiabilité des informations et les ressources disponibles. Les techniques d'analyse peuvent être qualitatives, quantitatives, ou une combinaison de celles-ci, selon les circonstances et l'utilisation prévue.

Il convient que l'analyse du risque prenne en compte des facteurs tels que :

1. La vraisemblance (possibilité que quelque chose se produise) des événements et des conséquences ;
2. La nature et l'importance des conséquences ;
3. La complexité et l'interconnexion ;
4. Les facteurs liés au temps et la volatilité ;
5. L'efficacité des moyens de maîtrise existants ;
6. Les niveaux de sensibilité et de confiance.

Les événements extrêmement incertains peuvent être difficiles à quantifier. Cela peut poser problème lors de l'analyse d'événements ayant de graves conséquences. Dans de tels cas, l'utilisation d'une combinaison de techniques permet généralement d'acquérir une connaissance plus approfondie.(“ISO 31000 VERSION 2018.pdf,” n.d.)

. Il existe différents classements des méthodes d'analyse de risques, nous retiendrons ici trois de ces classements :

- Méthodes qualitatives ou quantitatives,
- Méthodes inductives ou déductives,
- Méthodes statiques ou dynamiques

L'analyse du risque fournit des données permettant d'évaluer le risque, de prendre la décision de le traiter ou non et de quelle manière, et permet de choisir la stratégie et les méthodes de traitement les plus performantes. Les résultats fournissent des renseignements en vue des décisions quand il faut effectuer des choix et que les options impliquent différents types et niveaux de risque.

## **I-6- Objectifs – intérêts des méthodes d'analyse de risques :**

### **1 - Concept de base :**

Les risques doivent être identifiés et analysés avant les "accidents".

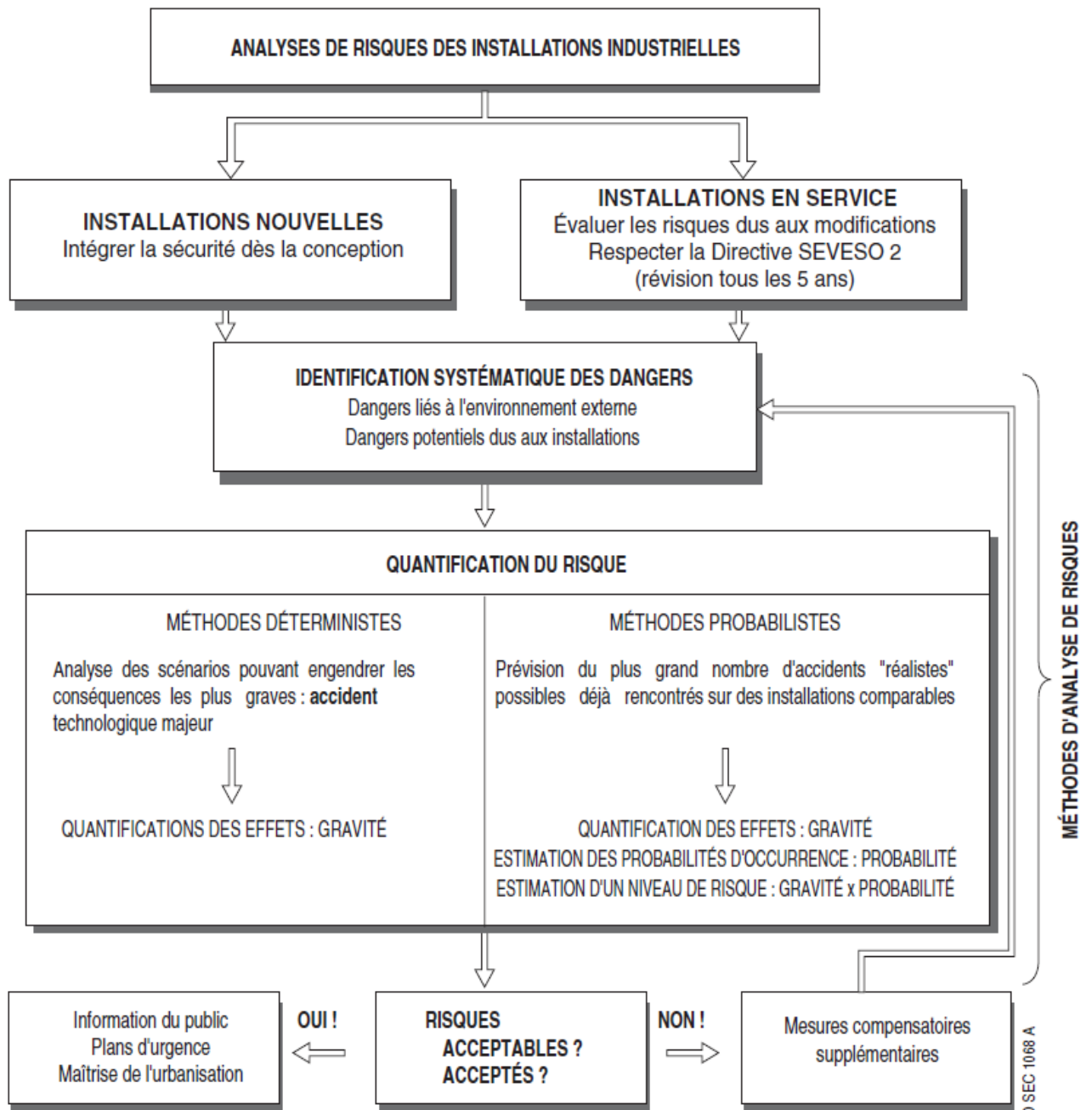
### **2 - Objectif général des méthodes d'analyses de risques**

Apprécier le niveau de dangerosité (risques et conséquences) d'une installation.

### **3 - Diminuer les risques techniques à la source, pour :**

- Assurer et améliorer en continu :

- La protection de l'exploitant
- La protection de l'environnement et des populations
- La qualité de la production
- La fiabilité de l'outil
- Se conformer à la réglementation.
- Faire des investissements appropriés au niveau de risque.



- Figure I.3 : L'analyse du risque ("enspm 2005" n.d.)-

**I-7 - Résultats attendus :**

Réduction du risque à la source par

<p align="center"><b>LA PRÉVENTION</b> (Réduction de la probabilité de l'accident)</p>	<p align="center"><b>LA PROTECTION</b> (Réduction de la gravité de l'accident)</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Élimination du risque (Changement de procédé, de produits, de matériel, ...)</li> <li>• Limitation des paramètres dangereux (Domaines de fonctionnement et paramètres nominaux - Contrôle des limites - Surveillance et contrôle automatique)</li> <li>• Dispositif de mise en sécurité, de blocage et d'interdiction</li> <li>• Réduction des probabilités de pannes ou d'erreurs (Marges de sécurité - Redondances - Maintenance préventive)</li> <li>• Éloignement des sources d'agression</li> <li>• Récupération après défaillant</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dispositifs d'isolement, de rétention</li> <li>• Équipements de protection</li> <li>• Confinement</li> <li>• Dispositifs limitant la Destruction des équipements.</li> <li>• Résistance aux agressions Externes</li> </ul>

**-Tableau I.2:** Réduction du risque à la source (la prévention et la protection)  
("enspm 2005 " n.d.) -



## I -8- Méthodes d'analyse de sûreté de fonctionnement :

Une analyse prévisionnelle de sûreté de fonctionnement est un processus d'étude d'un système réel de façon à produire un modèle abstrait du système relatif à une caractéristique de sûreté de fonctionnement (fiabilité, disponibilité, maintenabilité, sécurité). Les éléments de ce modèle seront des événements susceptibles de se produire dans le système et son environnement, tels par exemple : ("cours.pdf," n.d.)

- des défaillances et des pannes des composants du système,
- des événements liés à l'environnement,
- des erreurs humaines.

Les moyens de la Sûreté de Fonctionnement, sont des solutions éprouvées pour casser les enchaînements dans la trilogie faute, erreur et défaillance :

- Prévention de faute, pour éviter des fautes qui auraient pu être introduites pendant le développement du système
- Tolérance aux fautes, pour mettre en place des mécanismes qui maintiennent le service fourni par le système, même en présence de fautes. On accepte dans ce cas un fonctionnement dégradé
- Élimination de faute qui peut être divisée en 2 catégories :
  - Élimination pendant la phase de développement
  - Élimination pendant la phase d'utilisation
- Prévision de faute, pour anticiper les fautes (de manière qualitative ou quantitative) et leur impact sur le système

C'est le domaine de la prévision qui va nous intéresser le plus avec des outils comme :

- Approche qualitative :
  - Analyse préliminaire des risques (APR)
  - HAZOP (Etude de Sécurité sur schémas de circulation des fluides)

- Détermination des conséquences (AMDEC)
- Identification des causes (Arbres de défaillances) .....
- Approche quantitative (probabiliste)
  - Approche Bayésienne
  - Arbres de défaillances (Traitement mathématique)
  - Bloc Diagramme de Fiabilité (BDF), ou Diagramme de Fiabilité ou Reliability Block Diagram (RBD)
  - Chaînes de Markov
  - Réseau de Petri
  - Modèles de croissance de fiabilité.(Moïsiso, 2016)

Nous ne verrons dans la suite que quelques-unes de ces méthodes.

## **I-9-Les Méthodes En Revue :** (“enspm 2005.pdf,” n.d.)

### **I -9- 1- HAZOP (HAZARD AND OPERABILITY STUDY) ou Etude de Sécurité sur schémas de circulation des fluides :**

#### **1 – Objectif :**

- Recherche systématique des causes possibles de dérive de tous les paramètres de fonctionnement d'une installation
- Mise en évidence des principaux problèmes d'exploitation et d'entretien
- Étude des conséquences et risques éventuels liés à ces dérives
- Proposition des mesures correctives appropriées

#### **2 - Mise en œuvre de la méthode :**

- Constituer une équipe pluridisciplinaire
- Préparer les documents nécessaires : plan de circulation des fluides (PCF, PID), autres documents préparatoires (éléments caractéristiques des capacités, des pompes, ...) à jour
- Découper l'installation en systèmes géographique-fonctionnels aussi simples et homogènes que Possible.

- Faire une hypothèse de dérive, pour chaque système, en combinant Paramètres de fonctionnement et Mots clés
- Rechercher les causes possibles de dérive
- Déterminer les conséquences
- Établir si nécessaire une semi-quantification du risque (probabilité, gravité)
- Apporter les mesures compensatoires nécessaires : prévention, détection, protection
- Vérifier que la mesure corrective n'apporte pas de risque nouveau

### **3 - Constitution de l'équipe pluridisciplinaire :**

Dans le cadre d'un projet nouveau, la présence des fonctions suivantes est nécessaire :

- Responsable projet
- Instrumentiste (à la demande)
- Entretien (à la demande)
- Fabrication
- Procédé
- Sécurité
- Construction
- Animateur (Ingénieur confirmé n'ayant pas de responsabilité sur le projet ou sur l'installation)
- Secrétaire technique
- Spécialistes (à la demande)

### **4 - Paramètres de fonctionnement :**

- Pression
- Température
- Concentration ou composition chimique
- Contamination (polluant)
- Agitation
- Niveau
- Incompatibilité
- Débit
- Panne d'utilité

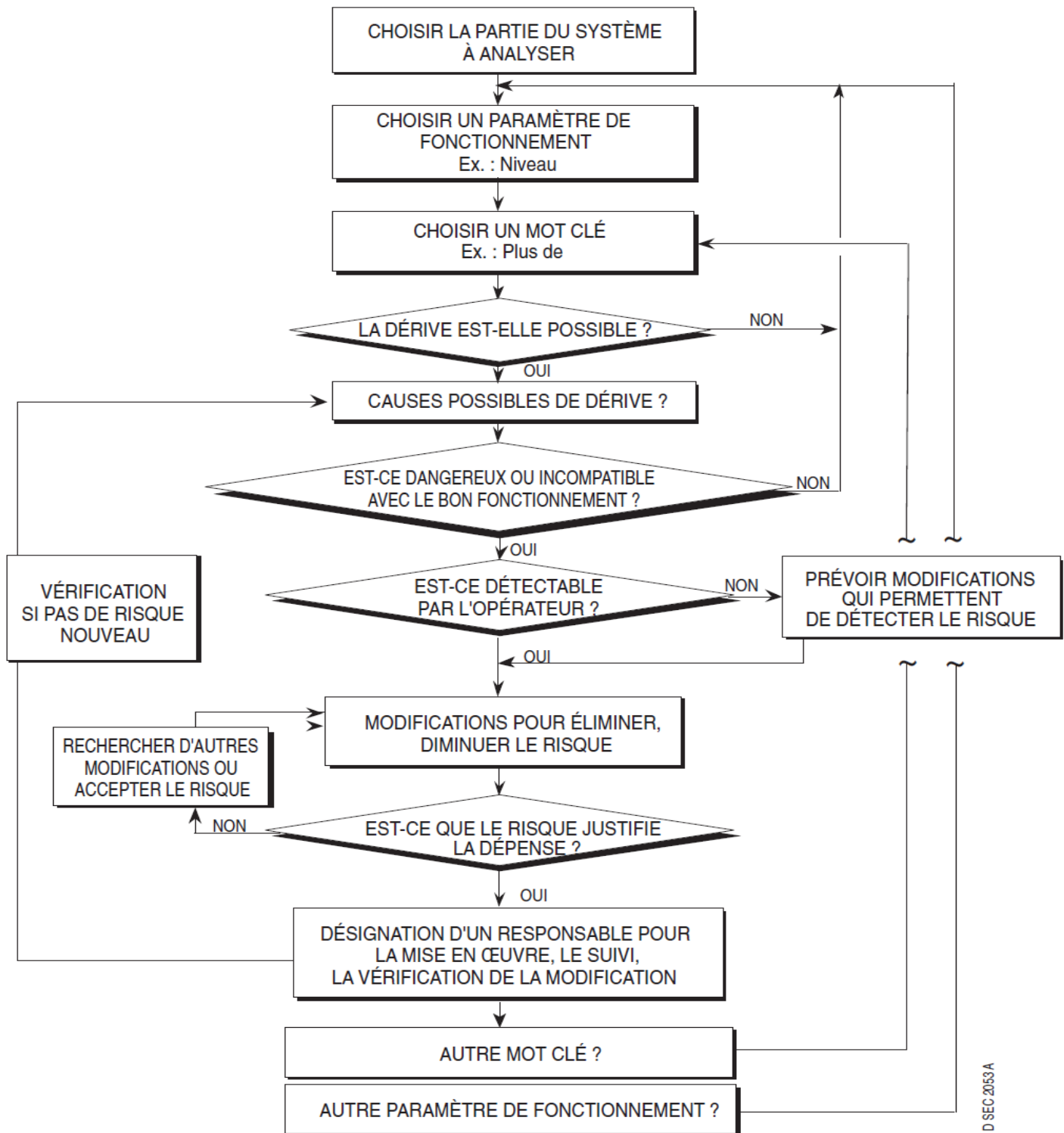
- Électricité statique
- Viscosité
- .....

## 5 - Déviations - Mots clés :

DÉVIATIONS - MOTS CLÉS		SIGNIFICATIONS
NONE	<b>Pas de</b>	Absence de débit, de courant
MORE OF	<b>Plus de Trop de</b>	Excès de température, niveau, débit, pression, viscosité, ...
LESS OF	<b>Moins de Pas assez de</b>	Baisse de température, niveau, débit, pression, viscosité, ...
PART OF	<b>En partie</b>	Absence d'un constituant, changement dans la composition d'un fluide
MORE THAN	<b>Plus que</b>	Présence d'impuretés (acide, air, eau, produits de corrosion, ...) Présence d'une phase supplémentaire (gaz, solide)
REVERSE	<b>Inversé</b>	Inversion de débit
OTHER THAN	<b>Autre que</b>	En dehors du fonctionnement normal Démarrage et arrêt intempestifs, bas régime, changement de catalyseur

**-Tableau I.3:** Déviations - Mots clés de la méthode HAZOP  
("enspm 2005 " n.d.) -

6 - Déroulement de la méthode HAZOP :



D SEC 2063A

- Figure I.4 : Déroulement de la méthode HAZOP (“enspm 2005 ” n.d.) -

## 7 - Intérêt et Limites de la Méthode :

- Méthode lourde à mettre en œuvre sur des installations complètes qui pour être efficace doit être appliquée de manière rigoureuse
- Méthode qui ne permet pas :
  - d'être sûr d'avoir pris en compte tous les risques
  - de traiter le cas de défaillances multiples
- Méthode systématique et qualitative qui vient en complément de l'APR. Elle permet l'examen méthodique des risques par un groupe pluridisciplinaire, de déceler les problèmes de sécurité et d'opérabilité.
- Méthode qui permet d'améliorer le niveau de sécurité des unités neuves ou existantes
- Méthode utilisable pour gérer les modifications

## I -9- 2- Méthode C.C.C. (Causes - Conséquences - Compensations) :

### 1 – Objectif :

- Rechercher les causes (et les origines) pouvant conduire à un événement redouté et en déduire les conséquences.
- Vérifier que les compensations prises sont suffisantes. faire des recommandations si nécessaires.

### 2 - Mise en œuvre de la méthode :

- Méthode d'analyse qui fait suite à l'HAZOP.
- Constituer une équipe pluridisciplinaire.
- Définir le système analysé et ses sous-systèmes.
- Déterminer l'événement redouté (risque).
- causes - conséquences locales et sur le système.
- Commentaires - actions correctives.

### 3 - Intérêt et Limites de la Méthode :

- Méthode simple et rapide pour un équipement mais peut être utilisé pour une installation complète.

- Méthode non systématique et qui ne tient pas compte des interactions entre sous-systèmes.

## **I -9- 3- Analyse des modes de défaillance, de leurs effets et de leur criticité (AMDEC) :**

### **1 – Objectif :**

- Rechercher les défaillances pouvant conduire à un événement indésirable
- Classifier ces défaillances
- Contrôler les défaillances critiques au moyen d'actions correctives

### **2 - Mise en œuvre de la méthode:**

- Définir le système
- Découpage du système en sous-systèmes, assemblage, composant, etc.

#### **Exemple : compresseur alternatif**

- compression du gaz (cylindre, pistons, clapets)
- étanchéité
- transmission du mouvement
- Définir les modes de défaillance
- Causes des défaillances sous l'angle de fonction et défaillances de performances
- Effets des défaillances locaux et sur le système
- Compensations / détection
- Gravité / probabilité / criticité (niveau de risque)
- Actions correctives.

### **3 - Intérêt et limites de la méthode :**

- Analyse qualitative et quantitative rigoureuse et précise
- Intègre différentes notions liées à la sécurité : maintenance, opérabilité, fiabilité
- Méthode longue et fastidieuse pour systèmes complexes. Toutefois la méthode peut être arrêtée à l'analyse qualitative et porte le nom de AMDE
- Inadaptée pour système très informatisé
- Ne permet pas de détecter les défaillances multiples
- Difficultés pour déterminer "à quel niveau ?" doit s'arrêter l'analyse
- Démarche inverse de l'arbre des défaillances

## I -9- 4- Arbre de défaillances (ADD) :

### Méthode appelée aussi :

- Arbre de dysfonctionnements
- Arbre des défauts
- "Fault Tree Analysis"

### 1 - Objectif

- À partir d'un événement final indésirable, rechercher les combinaisons des différents événements élémentaires ou défaillances qui peuvent y conduire
- Réduire la probabilité d'occurrence de cet événement final

### 2 - Mise en œuvre de la méthode :

#### a - Principe

- Définir l'événement final indésirable
- Représenter graphiquement les combinaisons d'événements par un "arbre"
- Arbre formé de niveaux successifs tel que chaque événement soit généré à partir d'événements inférieurs par l'intermédiaire de portes logiques "ET" et "OU"
- Se poser la question: "QU'EST-CE QU'IL FAUT POUR QUE L'ÉVÉNEMENT SE PRODUISE ?"
- Construction de l'arbre arrêtée lorsque les événements élémentaires:
  - sont indépendants entre eux
  - leur probabilité peut être estimée
  - il est décidé de ne pas les décomposer en combinaison d'événements plus simples

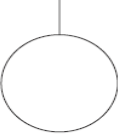
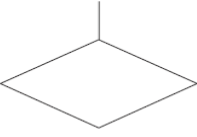

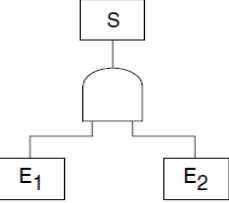
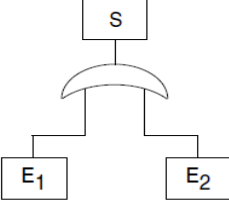
#### b - Déroulement

- Définition de l'événement final indésirable
- Étude de système
- Construction de l'arbre
- Exploitation de l'arbre:
  - évaluation de la probabilité des événements élémentaires
  - calcul de la probabilité de l'événement final
  - mise en évidence des chemins critiques



- modification de la structure de l'arbre par adjonction de barrières supplémentaires

**3 - Symbolisme simplifié :**

Symbole	Nom du symbole	Signification du symbole
	Cercle	Représentation d'un événement élémentaire
	Losange	Représentation d'un événement qui ne peut être considéré comme élémentaire, mais dont les causes ne sont pas développées faute de renseignement ou faute d'intérêt
	Rectangle	Représentation d'un événement final non désiré ou d'un événement intermédiaire résultant de la combinaison d'événements plus élémentaires par l'intermédiaire de portes logiques
	Porte ET	L'événement de sortie S est généré si les événements $E_1$ et $E_2$ sont présents simultanément
	Porte OU	L'événement de sortie S est généré si l'un au moins des événements $E_1$ et $E_2$ sont présents

- **Figure I.5** Symbolisme d'ADD ("enspm 2005" n.d.)-

### **I-5-Conclusion**

Ce chapitre a fait l'œuvre d'une revue de littérature sur l'analyse par sûreté de fonctionnement, une discipline de plus en plus utilisée dans les systèmes industriels pour des questions de contrôle de sécurité, d'amélioration de la disponibilité et de garantie de la fiabilité en tenant en considération la notion du coût.

## II.1 Introduction :

L'étude de la sûreté et la sécurité est un domaine très vaste qui comprenant plusieurs étapes, et parmi ces étapes on trouve l'analyse des risques qui est le but de notre étude.

Dans ce deuxième chapitre Une présentation des méthodes quantitatives sera faite. Ces méthodes sont venues compléter les approches qualitatives, qui avaient pour objectif de décrire les risques et leurs conséquences sans se soucier de leurs fréquences d'apparition et l'influence exacte et quantifiés entre les différents éléments du système.

## II-2-Approches quantitatives (Probabilistes) :

« Evaluer non seulement la gravité d'un accident, mais également sa probabilité d'occurrence. Cette évaluation quantitative est réalisée en supposant le succès ou l'échec des barrières de sécurité existantes » (Gaston and Gaston, 2003)

Transport, nucléaire, aéronautique, aérospatial, défense

### II-2-1-Données d'entrée :

Ces approches ont pour données d'entrée : les plans et les diagrammes du système ou site étudié, les données de fiabilité que ce soit des données génériques ou spécifiques tels que les jugements d'experts, la réglementation et les normes...

Les approches quantitatives permettent : l'identification de plusieurs scénarios, de faire des calculs sur la gravité, criticité..., une représentation des risques individuels, sociétaux et environnementaux...

### II-2-2-Avantages et limites :

Avantages	Limites
<ul style="list-style-type: none"><li>➤ Probabilité x Fréquence =&gt; Analyse des risques « Risk-based approach »</li><li>➤ Gestion des risques (protection, prévention)</li><li>➤ Prise en compte des barrières en place</li><li>➤ Critères d'acceptabilité (RI, RS) - Prise en compte population)</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>➤ Coût + temps + expertise (transparence)</li><li>➤ Communication sur les résultats (domaine du postulé)</li><li>➤ Base de données nécessaire</li><li>➤ Incertitudes, approximations</li></ul>

<ul style="list-style-type: none"><li>➤ Comparabilité des résultats entre installations, entre secteurs</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>➤ Cadrage national pour critères acceptabilité (ex. Nucléaire : <math>10^{-5}</math>/an/tranche ; aviation : <math>10^{-7}</math>/h de vol ; espace : <math>10^{-6}</math>/h de vol)</li><li>➤ Vision technique des systèmes</li></ul>
---	--

**Tableau II.1:** Avantages et limites des approches quantitatives (Probabilistes)

### II-3-A-Etudes Probabilistes de Sûreté (EPS) :

Leurs premières applications dans le nucléaire dès 1975 aux USA et début des 80's en France. Les EPS examinent l'ensemble des barrières physiques et lignes de défenses organisationnelles, elles permettent d'évaluer la "Défense En Profondeur" d'une installation, elles sont particulièrement utiles pour la phase d'amélioration de la "Défense En Profondeur" (INSAG, 1994). Leur importance réside dans le développement et l'exploitation des banques de données de fiabilité matérielle et humaine sous forme de Retour d'Expérience (REX). Elles produisent des supports méthodologiques : Arbre des Causes / Conséquences.

#### Objectif :

- Évaluer la sûreté de l'installation en se fondant sur la probabilité de défaillance des éléments et matériels du système et sur l'évaluation des effets des procédures.
- Appliquées au cours de l'exploitation de la centrale, elles permettent d'évaluer en continu l'intérêt d'une modification d'équipement ou d'une procédure en donnant une appréciation quantitative.

#### L'EPS vise à :

- Identifier et caractériser les combinaisons d'événements pouvant conduire à un accident grave
- Estimer la probabilité d'occurrence de chaque combinaison
- Evaluer leurs conséquences

Cette méthodologie intègre les informations sûres :

- La conception de la centrale

- Les pratiques et l'historique d'exploitation
- La fiabilité des composants
- Le comportement humain
- Les phénomènes accidentels et les effets environnementaux et sanitaires potentiels

Le calcul de la probabilité d'occurrence des événements permet de concentrer les efforts de protection par rapport aux événements les plus probables.

Dans ce qui suit, nous présenterons quelques méthodes probabilistes les plus utilisées en fiabilité des systèmes, et principalement l'approche Bayésiennes.

### II-3-B - l'approche bayésienne (Aspects généraux) :

L'origine de cette idée remonte à Bayes qui l'a introduite dans son célèbre mémoire de l'année 1763.

D'un point de vue pratique, l'analyse bayésienne n'est rien d'autre qu'une méthode d'analyse statistique descriptive parmi les autres. En effet, est une approche spécifique de la statistique inférentielle qui propose une réponse à la fois unitaire et globale au problème inférentiel, dans le cadre paramétrique comme dans le cadre non-paramétrique. Elle se distingue des approches dites "classiques ou traditionnelles" par la construction et l'utilisation d'une loi de probabilité sur l'ensemble des notions pouvant faire l'objet d'une inférence, élaborée dans le cadre de la théorie bayésienne.(Zhu, n.d.)

#### II-3-B -1-Théorème de Bayes :

La formule de Bayes porte sur la notion de probabilité conditionnelle, elle permet d'actualiser la probabilité **a priori** d'un événement  $\theta$ , en fonction d'une nouvelle information  $X$  et d'obtenir ainsi la probabilité **a posteriori** de  $\theta$ . D'une façon générale.

Si  $\theta$  et  $X$  sont des événements tels que  $P(X) \neq 0$ , alors  $P(\theta | X)$  et  $P(X | \theta)$  sont reliées par :

$$P(\theta|X) = \frac{P(\theta)P(X|\theta)}{P(X)}.$$

- $\Theta$  est le paramètre à estimer,
- $X$  les données,
- $P(\theta)$  a loi a priori de  $\theta$  qui représente la connaissance sur  $\theta$  avant l'observation des données  $X$ ,

- $P(X|\theta)$  est la vraisemblance des données, c'est-à-dire la probabilité d'observer les données sachant  $\theta$ ,
- $P(\theta|X)$  est la loi a posteriori de  $\theta$ , c'est-à-dire la distribution du nouvel état de connaissance sur le paramètre  $\theta$ , issu de la combinaison de la connaissance a priori et de l'information apportée par les données.

### **II-3-B -2- l'approche bayésienne vs l'approche classique :**

En général, Il offre deux points de vue d'interprétation : dans l'approche classique, le paramètre  $\theta$  est une valeur certaine, mais inconnue ; dans l'approche bayésienne  $\theta$  apparait comme une variable aléatoire.

D'une manière générale, cette analyse apporte, dans le domaine des modèles descriptifs, les idées suivantes :

- L'analyse statistique permet, dans la planification des expériences, de considérer toutes les informations quantitatives et qualitatives sur l'incertitude dans les modèles ; « il s'agit du paramètre  $\theta$  ».
- Le paramètre  $\theta$  est considéré, dans l'approche classique, comme une grandeur inconnue (un vecteur dans le cas multidimensionnel), mais certaine. Dans l'approche bayésienne, il peut prendre plusieurs valeurs possibles, avec des probabilités associées, ce qui conduit à trouver des distributions sur l'espace des paramètres. Différents modèles sont adaptés à ces développements.
- Des informations sur ce paramètre  $\theta$  avant échantillonnage permettent d'évaluer une loi de distribution, dite "a priori". L'analyse bayésienne consiste à déduire de cette loi de distribution, grâce au théorème de Bayes, une distribution dite "a posteriori", en ajustant la valeur du paramètre par un jugement probabiliste de l'incertitude compte tenu des données recueillies dans un échantillon X.

### **II-3-B -3-Le déroulement de l'approche bayésienne :**

\*Cette analyse bayésienne intègre, outre le plan d'échantillonnage traditionnel, les résultats d'expériences conçues antérieurement et les exploite de manière optimale lorsque les données expérimentales sont insuffisantes pour appliquer l'analyse fréquentiste (l'approche classique).

\*De plus, cette analyse offre une possibilité supplémentaire : la loi a priori représente toutes les informations pertinentes provenant de données antérieures, mais il est possible d'y incorporer toute connaissance ou opinion, même très conjecturale ou "subjective" que l'on peut avoir sur le problème étudié.

\*Après l'établissement d'une distribution a priori du paramètre inconnu  $\theta$ , si des expériences complémentaires sont réalisées, on reprendra la distribution a posteriori de ce paramètre comme nouvelle distribution a priori. On aura ainsi une distribution réactualisée qui incorporera les apports des expériences successives.

\*La distribution a priori vise à représenter un "état d'ignorance" sur le paramètre  $\theta$  ; la distribution a posteriori correspondante pourra alors être interprétée comme résultant de l'apport propre des données. (Zhu, n.d.)

*Le cadre bayésien se présente donc comme une théorie formalisée de l'apprentissage par l'expérience.*

### **II-3-B -4-Le principe et la fonction de vraisemblance :**

Soit  $x = (x_1, \dots, x_n)$  un échantillon de la variable aléatoire  $X$ . dans la plupart des problèmes, nous cherchons à déterminer le paramètre inconnu  $\theta$  de manière à maximiser la probabilité d'observer l'échantillon  $x$  dans la famille de distributions possibles. Nous considérons alors la densité de cet échantillon  $P(X|\theta)$  comme une fonction de  $\theta$ , appelée dans ce cas fonction de vraisemblance de  $\theta$  en  $x$ .

Le principe de vraisemblance repose sur les hypothèses suivantes :

- L'information concernant le paramètre  $\theta$ , tirée de l'observation (ou de l'échantillon)  $x$ , est contenue dans la vraisemblance  $L(X|\theta)$ .
- à deux séries d'observations  $x_1$  et  $x_2$  sur le même paramètre  $\theta$  avec des fonctions de vraisemblance proportionnelles, donc telles que, pour tout  $\theta$ ,  $L(\theta / X_1) = L(\theta / X_2)$  de conduire à la même inférence sur ce paramètre  $\theta$ .

Dans l'approche classique, on cherche à déterminer une (des) valeur(s) de  $\theta$  qui maximise la fonction de vraisemblance  $L(\theta;x)$ , appelée estimateur du maximum de vraisemblance. Ceci est l'une des approches compatibles avec le principe de vraisemblance. Nous verrons que l'approche bayésienne intégré de manière automatique la notion de vraisemblance (cf.

formule de Bayes) avec  $L(\theta;x) = P(x| \theta)$ . Nous utiliserons souvent  $P(x| \theta)$  comme la fonction de vraisemblance au lieu de  $L(\theta;x)$  pour alléger l'exposé.(Robert, 2014)

### II-3-C- La simulation Monte-Carlo :

La méthode de simulation de Monte Carlo est très utilisée en analyse des risques, ainsi que dans de nombreux domaines scientifiques (finance, ingénierie, etc.). Cette méthode probabiliste simple permet d'obtenir un échantillon de la distribution de la sortie du modèle à partir d'échantillons des variables d'entrée du modèle. Un grand nombre de tirages aléatoires est effectué dans les distributions de probabilité des variables d'entrée, et les sorties correspondantes du modèle sont calculées (de manière déterministe ou probabiliste selon les modèles). Chaque simulation est un calcul numérique sensé correspondre à une situation possible, plus ou moins probable, d'un système réel. Des statistiques sont ensuite calculées sur les résultats des simulations. La méthode donne des résultats approchés mais il est possible de contrôler la précision des calculs en fonction du nombre d'itérations effectuées.

Dans une simulation de Monte Carlo, les distributions de probabilité sur les variables d'entrée du modèle représentent de l'incertitude, de la variabilité, ou un mélange des deux.

Dans la simulation de Monte Carlo, la nature des distributions de probabilité n'est pas distinguée. (Rigaux, n.d.)

Ces types de simulation sont assez répandus, car leur mise en place est simple et ne nécessite pas de dissocier la part de variabilité et la part d'incertitude quand les deux types d'aléa affectent une variable.

Une application classique des méthodes Monte-Carlo est le calcul de quantités du type :

$$I = E[\phi(X)] = \int \phi(x)f(x)dx,$$

où  $\phi : \mathbb{R}^d \rightarrow \mathbb{R}$  est une fonction donnée et  $X$  un vecteur aléatoire de densité  $f$  suivant laquelle on sait simuler. Dans ce contexte, l'estimateur Monte-Carlo de base est défini par :

$$\hat{I}_n = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \phi(X_i),$$



où les  $X_i$  sont générées de façon indépendantes et identiquement distribuées (i.i.d). selon  $f$ . Outre les propriétés de cet estimateur, ce chapitre explique comment on peut éventuellement améliorer sa précision grâce à des techniques de réduction de variance.

### II-3-C-1- Méthode de Monte-Carlo :

La méthode Monte-Carlo est souvent employée lorsque le système contient des entrées stochastiques. Dans ce cas, la simulation comporte trois volets soit l'échantillonnage, l'intégration et l'analyse des incertitudes.

#### II-3-C-1-1- Échantillonnage probabiliste :

L'échantillonnage probabiliste consiste à définir un ensemble de variables aléatoires, appelé échantillon. Cet ensemble provient des composants d'un système générée selon le principe de la randomisation. Pour ce faire, il faut d'abord effectuer plusieurs tirages aléatoires pour chacune des variables incertaines. Ensuite, il faut procéder à la sélection des variables qui respectent certains critères. Ces critères sont généralement obtenus à partir de l'analyse des données historiques (Savy, 2006; Statistique Canada, 2013).

La sélection des variables aléatoires peut se faire de plusieurs façons. Parmi les plus courantes, il y a l'échantillonnage aléatoire simple (EAS). Dans ce cas, le système est caractérisé par les propriétés suivantes (Statistique Canada, 2013) :

- Les échantillons des composants ont la même chance d'être sélectionnés.
- Toutes les combinaisons possibles des échantillons de système ont une chance égale de faire partie de l'échantillon.

En général, l'échantillon est caractérisé par des paramètres statistiques qui peuvent varier selon la loi de distribution choisie. Parmi les plus communes, il y a la moyenne, la variance, l'écart-type, et la covariance. Notons la série de variables aléatoires ( $x_1, x_2, \dots, x_n$ ), les paramètres statistiques sont alors :

- La moyenne  $\bar{x} = \sum_{i=1}^n x_i = (x_1 + x_2 + \dots + x_n) / n$
- La variance  $Var = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$
- L'écart-type  $S = \sqrt{Var}$

- La covariance  $Cov = \frac{S}{\bar{x}}$

### II-3-C-1-2- Intégration :

L'intégration de Monte-Carlo est une technique d'approximation qui permet de calculer des valeurs numériques en se basant sur un échantillon aléatoire. Plus précisément, elle estime que la grandeur d'une variable aléatoire est égale à son espérance mathématique  $E[X] = \mu$ . Ensuite, elle détermine l'espérance mathématique à partir de loi forte des grands nombres (Tuffin, 2010).

Supposons une suite  $(x_n)$  de variables aléatoires indépendantes et identiquement distribuées, tel que  $\forall i, [x_i] = \mu < \infty$ . La loi forte des grands nombres stipule alors que l'espérance mathématique converge presque sûrement vers la moyenne des réalisations lorsque  $n$  tend vers l'infini (Tuffin, 2010) :

$$E[X] = \lim_{n \rightarrow \infty} \bar{x}_n = \lim_{n \rightarrow \infty} (x_1 + x_2 + \dots + x_n)/n$$

En général, la simulation stochastique utilise plusieurs variables aléatoires à l'entrée du système. En effet, supposant  $X_1, X_2, \dots, X_m$  une série de  $m$  variables aléatoires utilisées comme intrant dans le modèle et  $Y$  le paramètre que l'on souhaite estimer tel que :

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_m)$$

$$\text{Alors, } (Y) = E(f(X_1, X_2, \dots, X_m)) = (y_1 + y_2 + \dots + y_n) / n$$

### II-3-C-1-3- Analyse des incertitudes :

La méthode de Monte-Carlo est caractérisée par un certain degré de précision. En effet, il existe souvent un écart entre la valeur simulée et observée. Dans ce cas, l'erreur d'approximation peut être estimée à partir du théorème central limite. Supposons une suite  $(X_i)_{i \geq 1}$  de variables aléatoires indépendantes et identiquement distribuées. Le théorème central limite suppose que le nombre d'itérations est suffisamment grand pour que la variable aléatoire  $\sqrt{n} \frac{\bar{X} - \mu}{S}$  converge vers une loi normale centrée réduite. Il s'agit donc d'une approche probabiliste qui permet de définir la marge d'erreur correspondant à un pourcentage de risque  $\alpha$ . Ainsi, l'intervalle de confiance est exprimé sous la forme (Tuffin, 2010, p. 14) :

$$[\bar{X} - z_{\frac{\alpha}{2}} \frac{S}{\sqrt{n}}, \bar{X} + z_{\frac{\alpha}{2}} \frac{S}{\sqrt{n}}]$$

Où  $z_{\alpha}$ , est le quantile correspondant au niveau de risque  $1 - \alpha$  déterminé à partir de la Table de la loi normale.

### Intérêts et limites :

L'augmentation de la puissance des moyens informatiques permet d'appliquer aisément cette méthode.

### II-3-D-Processus de Markov :

Un processus de Markov est un processus stochastique possédant la propriété de Markov. Dans un tel processus, la prédiction du futur à partir du présent n'est pas rendue plus précise par des éléments d'information concernant le passé. Les processus de Markov portent le nom de leur inventeur, Andreï Markov. (« Chaîne de Markov » 2020)

#### II-2-D-1-Objectif :

L'objectif est de modéliser la dynamique d'un système réparable en présence de pannes. La méthode des processus de Markov est basée sur la représentation graphique du processus à étudier. Il s'agit d'une méthode développée pour traiter les systèmes aléatoires dynamiques ; ces systèmes passent d'état en état au bout de durées aléatoires régies par les divers phénomènes (défaillances de composants, réparations) auxquels il est soumis. («Analyse de risques » n.d.)

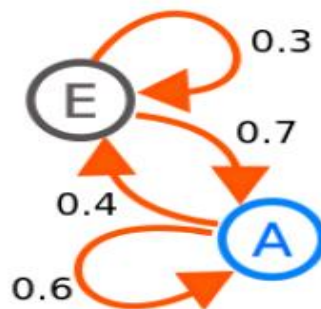


Figure II.1 : Exemple élémentaire de chaîne de Markov, à deux états A et E

### II-2-D-2-Construction d'un modèle :

Considérons un système composé de  $N$  composants, chaque composant ayant un nombre fini d'états de fonctionnement et de panne ; ce système est supposé réparable et chaque composant est réparé après constatation de la panne. Le système est donc composé :

- **Des états de fonctionnement** : un état de bon fonctionnement où tous les composants fonctionnent, et des états où certains composants sont en panne mais le système reste fonctionnel
- **Des états de pannes** : où suffisamment de composants sont en panne pour affecter le système global.

La construction du modèle se fait en 3 étapes :

1. Recensement de tous les états du système. Si chaque composant a 2 états (ok ou panne) et si le système a  $N$  composants, le nombre maximal d'états est  $2^n$ . Au cours de la vie du système, des états de panne peuvent apparaître à la suite de défaillance ou disparaître à la suite de réparation ;
2. Recensement de toutes les transitions possibles entre ces différents états et l'identification de toutes les causes de ces transitions. Les causes des transitions sont généralement des défaillances des composants ou la réparation de composants ;
3. Calcul des probabilités de se trouver dans les différents états au cours d'une période de vie du système, calcul des temps moyens (MTTF, MTBF, MTTR . . .)

### II-2-D-3-Intérêts et limites :

Lorsque le nombre d'états devient trop grand pour être appréhendé directement sans risque d'erreur, il est possible de faire appel à des outils qui, à partir d'une description par réseaux de Pétri ou de règles similaires à celles employées dans les systèmes experts, permettent de générer le processus de Markov équivalent. Ces descriptions étant beaucoup plus condensées que celle relative au processus markovien, l'analyste en conserve la maîtrise pour des systèmes faisant intervenir un plus grand nombre de composants.

Lorsque malgré tous les regroupements possibles le nombre d'états reste trop grand, alors il faut faire appel à d'autres techniques comme la simulation de Monte-Carlo. ("AdR DA de R - Méthodes qualitatives" n.d.)

### II-3-E-Méthode Bloc Diagramme de Fiabilité (BDF) :

#### 1-Objectif :

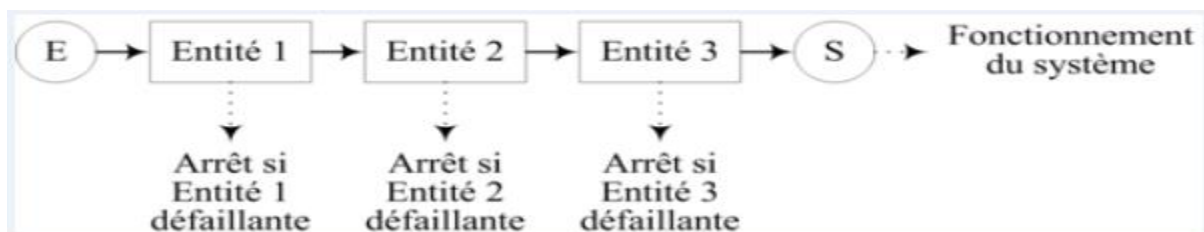
La méthode du « diagramme de succès » ou de « fiabilité » En anglais « Reliability Block Diagram Method » aboutit à une modélisation fonctionnelle d'un système en considérant que les fonctions globales de ce système résultent d'une mise en série et/ou en parallèle de fonctions élémentaires. Chaque composant du système, considéré comme indépendant, réalise une fonction autonome. L'évaluation de la fiabilité du système est déduite de cette modélisation fonctionnelle.

#### 2-Démarche :

La méthode du diagramme de fiabilité consiste à construire un diagramme composé de blocs, chacun d'eux représentant une entité (composant, sous-système, voire fonction), reliés par des arcs orientés indiquant les dépendances des entités entre elles. Le comportement des entités est binaire (fonctionnement/défaillance).

- Sur un même diagramme, il n'apparaîtra qu'un type d'entité (ou composant, ou sous-système, ou fonction).

Les diagrammes sont constitués d'une entrée E, d'un « corps diagrammatique » composé « d'Entité i » et d'une sortie S. Des exemples de diagramme de fiabilité sont présentés aux figures II.2 et II.3. On suppose, lorsque le système fonctionne, qu'un signal est émis en E et est transmis par les arcs jusqu'à la sortie S. La défaillance d'une entité entraînera l'arrêt du signal au niveau du bloc qui lui est associé.



**Figure II.2** : Exemple de diagramme de fiabilité en série. ("AdR DA de R - Méthodes qualitatives" n.d.)

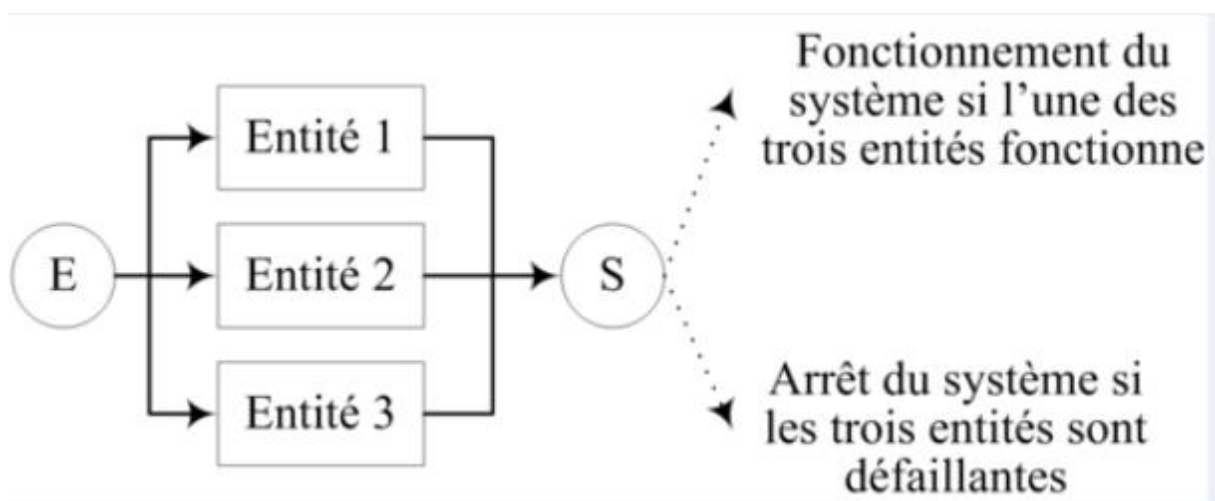
Un tel diagramme est une représentation statique du fonctionnement du système.

L'étude consiste à chercher les combinaisons de défaillances d'entités élémentaires conduisant à la défaillance du système, appelées coupes. Les coupes ne contenant aucune autre coupe sont dites minimales.

Les règles de transmission du signal sont les suivantes :

en série : toutes les entités doivent fonctionner pour que le signal passe (cf. Figure II.2) .

en parallèle : il suffit qu'une entité fonctionne pour que le signal passe (cf. Figure II.3).



**Figure II .3:** Exemple de diagramme de fiabilité en parallèle. (“AdR DA de R - Méthodes qualitatives” n.d.)

Si l'on note :

- $P_r^S$  et  $P_r^i$  les fiabilités (probabilités de non défaillance) respectivement du système S et des composants i,
  - $P_f^S$  et  $P_f^i$  les probabilités de défaillance respectivement du système S et des composants i,
  - $\prod_{i=1}^n$  L'opérateur produit.
- Alors la fiabilité d'un système composé de n composants élémentaires est donné par les formules suivantes :

Cas de n composants placés en série :

$$P_r^s = \prod_{i=1}^n P_r^i$$

cas de n composants placés en parallèle :

$$P_r^s = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_r^i) \quad \text{ou} \quad P_f^s = \prod_{i=1}^n P_f^i$$

Dans le cas de composants placés en série, la fiabilité du système diminue quand le nombre de composants augmente.

- La fiabilité du système est inférieure à la fiabilité du composant le moins sûr (maillon faible).
- Dans le cas de composants placés en parallèle, la fiabilité du système augmente quand le nombre de composants augmente.

### 3-Intérêts et limites :

La méthode du diagramme de succès ou de fiabilité permet d'identifier les composants critiques d'un système, de collecter des données de fiabilité des composants et de montrer comment répond un système à un mode de défaillance particulier afin de déterminer sa fiabilité globale.

Il s'agit d'une approche binaire (le composant et donc le système fonctionne ou ne fonctionne pas) qui peut donc difficilement à elle seule représenter la plupart des phénomènes de dégradation des composants et des systèmes du génie civil (dont la cinétique est progressive).

Pour obtenir la fiabilité du système il est nécessaire que chaque bloc soit indépendant, ce qui peut présenter quelques difficultés d'application dans le domaine de la construction puisque les causes aléatoires entraînant la défaillance possible d'un composant sont souvent communes à d'autres composants. ("AdR DA de R - Méthodes qualitatives" n.d.)

### II-3-F-Réseau de Pétri

#### 1-Objectif :

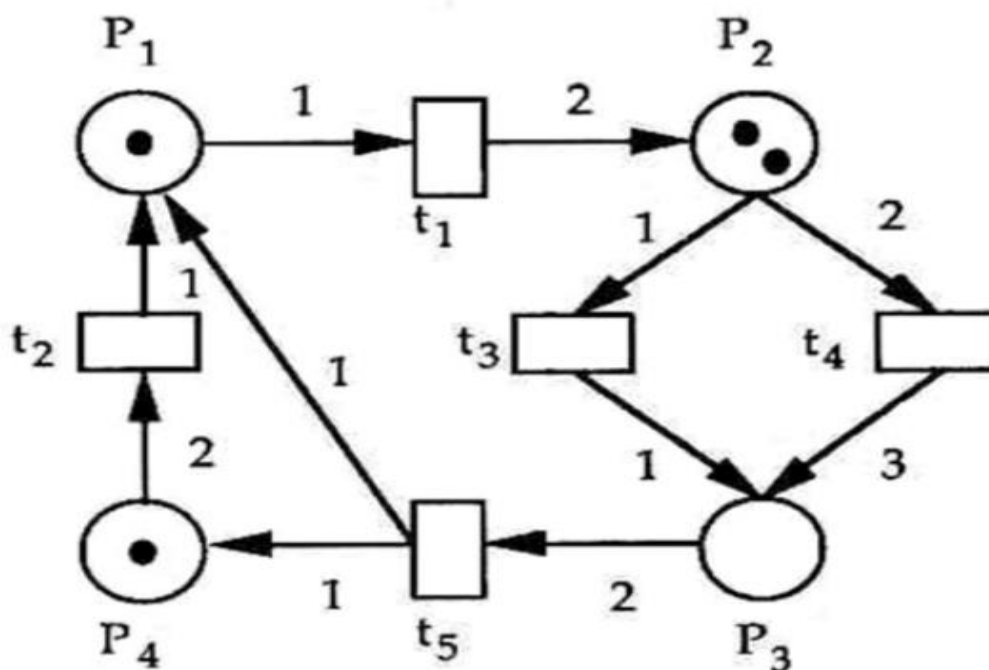
Un réseau de pétri permet de modéliser le comportement dynamique d'un système réparable en présence de pannes. Il s'agit d'une méthode développée pour traiter les

systèmes dynamiques ; ces systèmes passent d'état en état ou bout de durées aléatoires régies par les divers phénomènes (défaillances de composants, réparations) auxquels il est soumis.

**2-Démarche :**

Un réseau de Pétri est un graphe orienté dont les sommets peuvent être soit des places (représentés par des cercles) soit des transitions (représentées par des rectangles). Les sommets d'un réseau de Pétri sont reliés par des arcs. Un arc orienté relie toujours deux sommets de natures différentes. L'aspect dynamique, dans un réseau de Pétri, se traduit par la présence de jetons représentés par des points.

L'exemple de réseau de Pétri de la Figure II.4 comporte quatre places (P1, P2, P3 et P4) et cinq transitions (t1, t2, t3, t4 et t5).



**Figure II.4 :** Réseau de Pétri. (“AdR DA de R - Méthodes qualitatives” n.d.)

Le marquage d'un réseau de Pétri est la donnée du nombre de jetons dans chaque place. Il peut être associé un poids à chaque arc. Pour l'exemple précédent, l'arc (P1, t1) est pondéré par 1, l'arc (P2, t4) est pondéré par 2, l'arc (t4, P3) est pondéré par 3, etc.



Lors de son évolution, le réseau de Pétri parcourt séquentiellement les différents états du système modélisé. Cela peut être mis à profit pour :

- analyser en détail le comportement séquentiel du système,
- identifier les états en vue de la réalisation d'un graphe d'état (Markov),
- rechercher les états non accessibles,
- rechercher les blocages, les causes d'attente, les bouclages,
- rechercher les « conflits » (plusieurs transitions valides en même temps avec un devenir différent du réseau selon l'ordre du tir).

L'utilisation des réseaux de Pétri pour l'identification des divers états du système en vue de générer le processus de Markov équivalent est l'une des applications les plus courantes dans le cadre de la sûreté de fonctionnement.

### **3-Intérêts et limites :**

Bien que le nombre d'états engendrés par un réseau de Pétri soit dénombrable, il n'est pas forcément fini. Dès que le système étudié est complexe, le nombre d'états engendrés est important et il n'est plus possible de tous les identifier. Cette méthode ne peut être utilisée pour générer un graphe de Markov que lorsque le nombre d'états n'est pas trop grand (jusqu'à quelques milliers). La représentation par réseaux de Pétri étant beaucoup plus condensée que celle des processus de Markov, elle est alors plus facile à maîtriser. (“AdR DA de R - Méthodes qualitatives” n.d.)

### **II-4- Conclusion :**

Dans le cadre de ce présent chapitre, nous avons essayé de mieux situer les démarches et les approches quantitatives pour la sûreté de fonctionnement, nous avons d'abord clarifié les techniques de raisonnement de l'analyse prévisionnelle des risques les plus connues et leurs classifications selon leurs gravités et leurs criticités. L'ensemble des méthodes proposées au niveau de cette démarche, nécessitent un recueil de toutes les informations nécessaires sur le cas d'étude pour aboutir à un classement des niveaux de risque permettant, à partir des objectifs fixés, l'identification des types d'accidents avec leurs fréquences, et les scénarios d'accident, de faire des choix avec des priorités sur les efforts à faire pour diminuer les risques et leurs effets.

## III -1- Introduction :

Dans ce chapitre, L'ADD a été établie pour rechercher les combinaisons des différents événements élémentaires ou défaillances qui peuvent conduire un événement redouté, Où nous proposons l'étude du scénario d'incendie et d'explosion du réservoir au niveau de la zone de stockage du Centre NAFTAL de TIARET À partir d'un événement final indésirable, rechercher les combinaisons des différents événements élémentaires ou défaillances qui peuvent y conduire.

## III -2- Définition de la société NAFTAL :

NAFTAL étant la seule société algérienne responsable de la distribution et la commercialisation des produits pétroliers

NAFTAL est une société algérienne, filiale à 100 % de SONATRACH. Elle est chargée de la distribution des produits pétroliers sur le marché algérien.

Par transfert du monopole et de biens et personnels détenus ou gérés par SONATRACH, le 6 avril 1981 par décret N° 80/101, il est créé une entreprise nationale dénommée « Entreprise nationale de raffinage et de distribution de produits pétroliers » par abréviation (E.R.D.P), entreprise socialiste à caractère économique.

Entrée en activité le 1<sup>er</sup> janvier 1982, elle est chargée de l'industrie du raffinage des hydrocarbures liquides et de la distribution des produits raffinés sur le territoire national. Le 5 février 1983, par décret n°83-112, il est procédé à la modification de la dénomination de l'entreprise nationale de raffinage et de distribution de produits pétroliers d'E.R.D.P en *NAFTAL*.

En date du 25 août 1987, promulgation du décret n°87-190 portant création, par transfert de l'activité raffinage de NAFTAL, de l'Entreprise nationale de raffinage des produits pétroliers sous le sigle « NAFTEC »; NAFTAL est désormais chargée de la commercialisation et de la distribution des produits pétroliers et dérivés.

Le 18 avril 1998, elle change de statut avec la transformation de NAFTAL en société par actions au capital social de 6 650 000 000 DA, filiale à 100 % du holding SONATRACH Valorisation des Hydrocarbures. (« Manuel réalisation du centre de NAFTAL Tiaret.», s. d.)

## III 2-2- Activité :

NAFTAL a pour mission principale, la distribution et la commercialisation des produits pétroliers sur le marché national. Elle intervient dans les domaines :

- De l'enfûtage GPL.
- De la formulation de bitumes.
- De la distribution, stockage et commercialisation des carburants, GPL, lubrifiants, bitumes, pneumatiques, GPL/carburant, produits spéciaux.
- Du transport des produits pétroliers.

Pour assurer la disponibilité des produits sur tout le territoire, NAFTAL met à contribution plusieurs modes de transport :

- Le rail pour le ravitaillement des dépôts à partir des entrepôts.
- Le cabotage et les pipes, pour l'approvisionnement des entrepôts à partir des raffineries.
- La route pour livraison des clients et le ravitaillement des dépôts non desservis par le rail.

## III -2-3- Infrastructures :

Infrastructures opérationnelles :

- 47 dépôts carburants terre.
- 42 Centres et mini-centres GPL.
- 09 Centres vrac GPL.
- 47 Dépôts relais.
- 30 Dépôts aviation.
- 06 Centres marine.
- 15 Centres bitumes.
- 24 Centres lubrifiants & pneumatiques.

- Un Réseau de Transport pipelines d'une longueur de (2 720 km).
- Un Parc roulant de 3 300 unités.
- Un Réseau de stations-service de 674 dont 338 stations-service en gestion directe. NAFTAL dispose de deux (02) centres de formation d'entreprise qui accompagnent les plans annuels et pluriannuels de formation.

### **III -2-4- Produits et services :**

#### **a- Professionnel :**

- Aviation.
- Marine.
- Bitumes.
- Produits Spéciaux.

#### **b- Particulier :**

- Carburants terre.
- GPL.
- Lubrifiants.
- Pneumatiques.
- Sirghaz.
- Stations-service.

### **III -2-5- Environnement :**

Depuis l'année 2000, l'entreprise participe avec le ministère chargé de l'environnement au programme du plan national d'action environnementale adhérent ainsi aux principes d'une croissance économique durable d'un point de vue environnemental.

La protection de l'environnement constitue un axe stratégique de la politique de développement de NAFTAL, eu égard à la dangerosité des produits manipulés, stockés, transportés et commercialisés.

La maîtrise des risques liés à ces opérations vise la sécurité des personnes, des biens et la protection de l'environnement.

Les exigences strictes en matière de santé, de sécurité et de protection de l'environnement pour un développement durable.

### **III -2-6- Objectifs :**

- Améliorer sa qualité de service.
- La modernisation et la réhabilitation de ses infrastructures de stockage.
- La mise en conformité de ses installations avec les normes de protection de l'environnement et de la sécurité industrielle.
- La modernisation et l'extension de son réseau de stations de services.
- Le renouvellement de ses moyens de transport par route et de son matériel de manutention.
- L'augmentation de ces capacités de transport par pipe.

### **III 2-7- La macrostructures de NAFTAL :**

Dans cette partie, nous trouverons la hiérarchie suivante :

1. Le président directeur général « PDG ».

A ces cotés un conseiller et un directeur de projet central ainsi qu'un chef de projet.

2. Les trois branches principales de la société que sont :

- La branche carburant.
- La branche GPL.
- La branche commercialisation.

Avec des départements aux seins de chaque branche que sont : Administration, finances, ressources humaines, audit, juridique, santé et sécurité, système d'information, communication, maintenance et engineering. (« Manuel réalisation du centre de NAFTAL Tiaret.», s. d.)

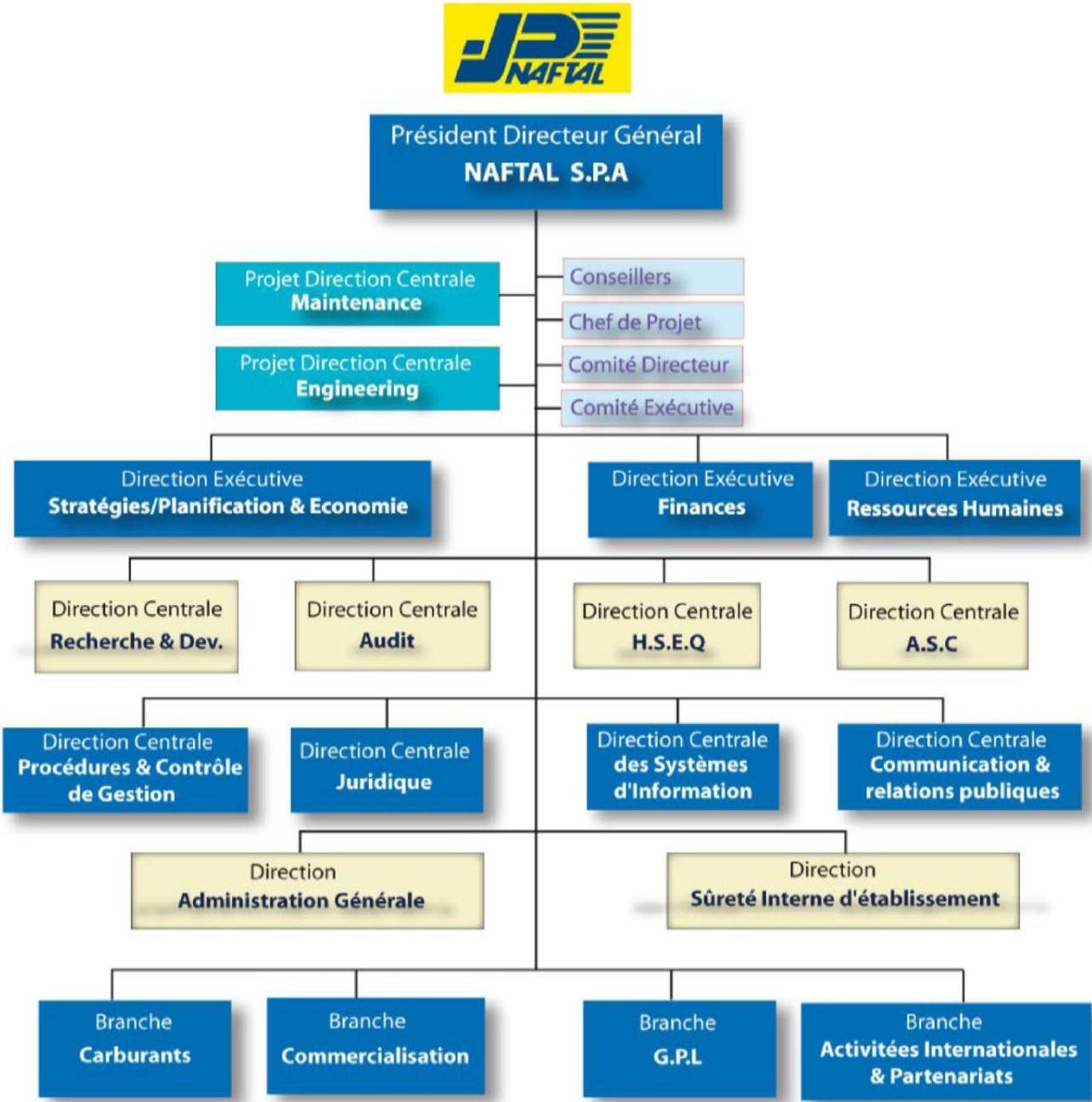


Figure. III.1 : Organigramme de la société NAFTAL (« Manuel réalisation du centre de NAFTAL Tiaret.», s. d.)

## III -3-Centre 1147Tiaret :

### III -3-1- Installation :

#### a- Pompes carburants :

PRODUIT	300 m <sup>3</sup> /h	150 m <sup>3</sup> /h	100 m <sup>3</sup> /h	Nombre Total Pompes
ESS.N	01	02	/	17 POMPES
ESS.SUP	/	02	/	
G.O	04	03	05	

**Tableau III-1 :** Les pompes du centre de NAFTAL. (« Manuel réalisation du centre de NAFTAL Tiaret.», s. d.)

#### b-Poste de chargement des camions :

03 Poste de chargement camions à double voies.

01 Poste de chargement camions (jet) à simple voie.

#### c- Poste de déchargement des camions :

07 pilots de déchargement camions.

#### d- Réseau anti-incendie :

Le centre 1147 TIARET est muni d'un réseau anti-incendie maille :

Bac eau incendie	1*1200 m <sup>3</sup>
Réservoir mousse	1*16 m <sup>3</sup>
Centrale anti-incendie	
02 Electropompes eau incendie	2*200 m <sup>3</sup> /h
01 Motopompe eau incendie	1*400 m <sup>3</sup> /h
01 Electropompes mousse	1*13 m <sup>3</sup> /h

01 Motopompes mousse		1*13 m <sup>3</sup> /h
01 Electropompes jocky		30 m <sup>3</sup> /h
Camion anti-incendie		
Capacité :	- Eau	4000 Litres
	- Mousse	1000 Litres
	- Poudre	1000 KG
	- Année de mise en circulation	1995

## **e- Réseau électrique :**

Arrivée SONELGAZ	30000	Volts
02 Transformateurs	630	Volts
01 Groupe électrogène	450	Volts

## **III -4- Situation géographique :**

a)- Région : SUD-OUEST.

- Altitude : 1050 m.

b)- Distances par rapport aux grands centres : 6 à 7 km du Centre de Tiaret.

Le Centre de TIARET est implanté dans la Zone industrielle ZAAROURA TIARET





**Figure. III.2 :** Le Centre de TIARET la Zone industrielle ZAAROURA TIARET(« Manuel réalisation du centre de NAFTAL Tiaret.», s. d.).

### **III-5-Fiche technique du centre 1147 Tiaret (BRANCHE CARBURANTS DISTRICT CBR TIARET) :**

Localité : Tiaret.

Adresse : Zone industrielle Tiaret.

Année de mise en exploitation : 1994.

Superficie totale assiette : 189800 M2.

Superficie totale bâtie : 27667 M2.

Source d'approvisionnement : ARZEW, SIDI BELABBES, ADRAR.

Moyen d'approvisionnement : par camion.

Zone d'influence : TIARET, TISSEMSILT, FRENDA, AFLOU.

Produit GAS-OIL : 21670 M3 dont : 02 x 2700 – 02 x 6000 – 03 x 1240 – 01 x 550.

Produit ESSENCE NORMALE : 8000 M3 dont : 01 x 4300 – 01 x 2500 – 01 x 1200.

Produit ESSENCE SUPER : 4900 M3 dont : 01 x 2500 – 01 x 1200.

## Installations fixes :

➤ Réservoirs : 14 dont : **08 à toit fixe** et 06 à toit flottant.

Pompières carburants :

✓ Produit GAS-OIL: 04 x 300 M3/H – 03 x 150 M3/H – 05 x 100 M3/H.

✓ Produit ESSENCE NORMALE : 01 x 300 M3/H – 02 x 150 M3/H.

✓ Produit ESSENCE SUPER : 2 x 150 M3/H.

Unité de traitement des effluents :

✓ Bassin d'orage : 60 M3.

✓ Séparateurs hydrocarbures : 2 x 83 M3.

✓ Cuve de récupération huiles usagées : 20 M3.

✓ Pompe à vis : 02 x 20 M3.

Poste de chargement camions :

✓ 03 postes à double voies munis de 17 bras perolo diamètre 04 pouces.

✓ 01 poste à simple voie muni d'un bras perolo diamètre 04 pouces.

Réseau anti incendie : 256 M2.

✓ Réseau anti incendie maille : 3000 ML.

✓ Réservoir eau incendie : 01 x 1200 M3.

✓ Réservoir mousse : 01 x 16 M3.

Centrale anti incendie :

✓ Electropompe eau incendie : 02 x 200 M3/H.

✓ Motopompe : 01 x 400 M3/H.

✓ Electropompe mousse : 01 x 13 M3/H.

✓ Motopompe mousse : 01 x 13 M3/H.

- ✓ Electropompe jockey: 01 x 30 M3/H.

Camion anti incendie :

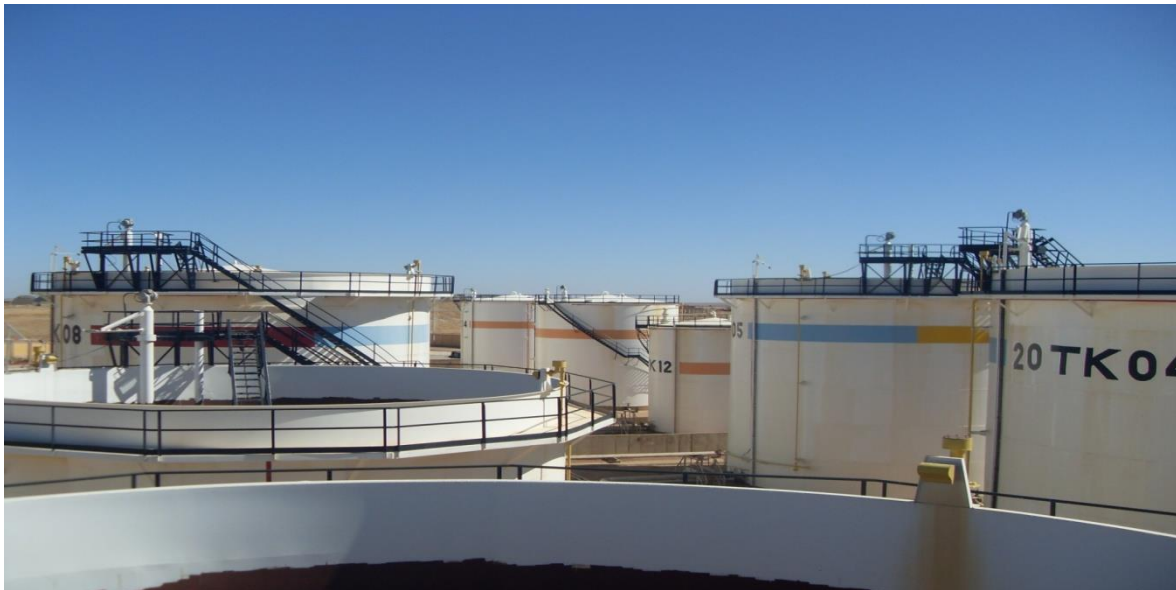
- ✓ Année de mise en circulation : 1995.
- ✓ Capacité en eau incendie : 4000 litres.
- ✓ Capacité en mousse : 1000 litres.
- ✓ Capacité en poudre : 1000 Kg.

Réseau électrique :

- ✓ Arrivée SANELGAZ : 30 kVa :
- ✓ Transformateurs de tension : 02 x 630 KVA.
- ✓ Groupe électrogène AMMIMER énergie : 01 x 450 KVA.

Installations annexes :

- ✓ Bloc administratif : 459 M2.
- ✓ Hangar lubrifiants : 4080 M2.
- ✓ Hangar pneumatiques : 5080 M2.
- ✓ Local d'entretien : 1200 M2. (« Manuel réalisation du centre de NAFTAL Tiaret.», s. d.)

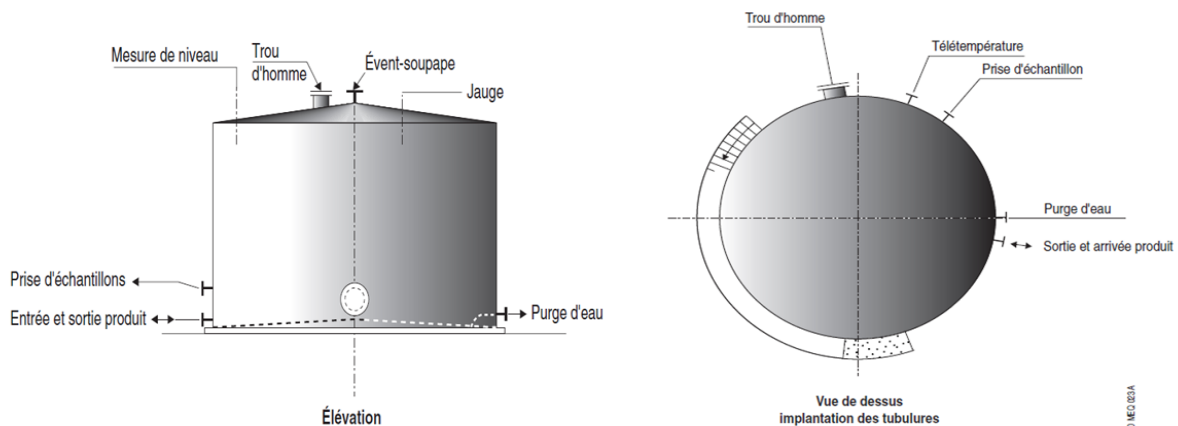


**Figure. III. 3 :** les 08 bacs de stockage du centre 1147 Tiaret (« Manuel réalisation du centre de NAFTAL Tiaret.», s. d.)

La zone de stockage parmi les milieux les plus à risque, elle est le responsable de l'assemblage de produit carburant avec des grandes quantités qui permet d'augmenter la probabilité d'occurrence d'un incendie ou une explosion du réservoir de stockage

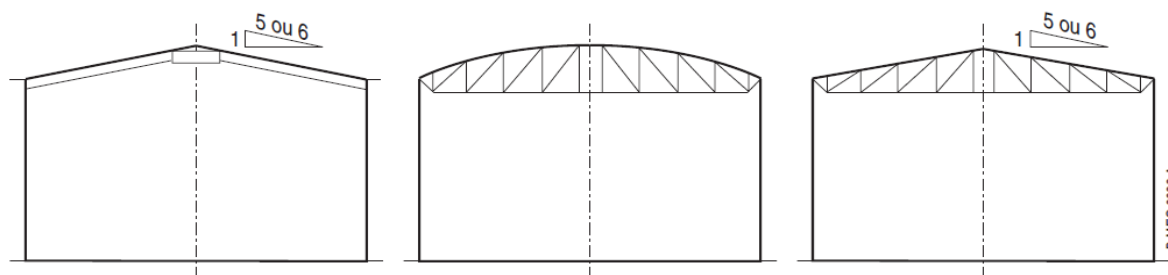
### **III-6-Bacs à Toit Fixe :**

Le réservoir équipé d'un toit fixe du type conique, en ombrelle, ou en parasol, est le plus économique à installer. Le toit fixe est d'une construction simple et, selon la taille du réservoir, il peut être du type autoportant ou non. (« IFP Training.2005 ENSPM », s. d.)



**Figure.III.4 :** Réservoirs à toit fixe (« D1-3\_A.pdf », s. d.)

Le toit autoportant conique a à peu près la forme d'un cône droit très plat et n'est supporté qu'à sa périphérie. Il n'est utilisé que pour des réservoirs de petits diamètres. (Même remarque pour toits autoportants, en dôme, ombrelle ou parasol). («IFP Training .2005 ENSPM», s. d.)



**Figure. III.5 :** Toits fixes autoportants (« D1-3\_A.pdf », s. d.)

Le toit conique supporté a approximativement la forme d'un cône. Les tôles du toit sont supportées par des profilés disposés en parapluie, supportés eux-mêmes par des profilés concentriques reposant sur des rangées de poteaux intérieurs. Plus le réservoir est grand, plus il faut de rangées de poteaux pour supporter le toit. («IFP Training .2005 ENSPM», s. d.)

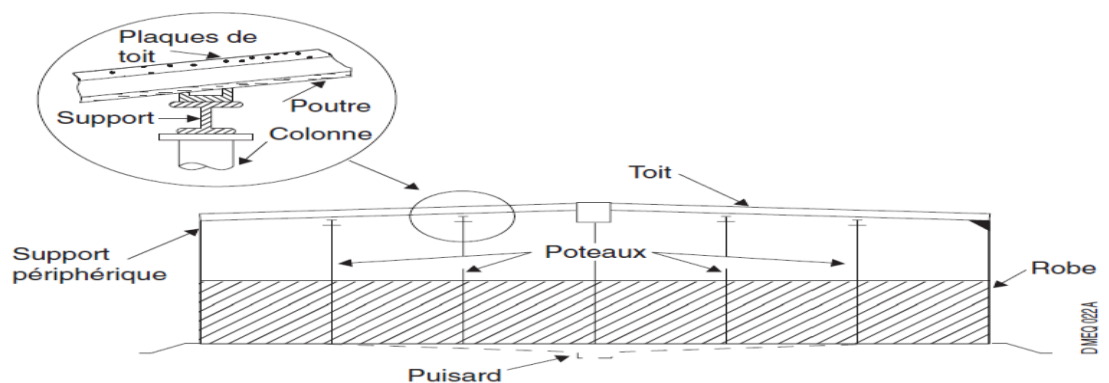


Figure. III.6 : Toit conique supporté (« D1-3\_A.pdf », s. d.)

### III-6-1 -Principaux élément constitutifs :

Il s'agit de réservoirs cylindriques constitués :

- d'un fond généralement bombé
- d'une robe ou virole
- d'un toit fixe
- de différents accessoires : échelle d'accès, soupapes de sûreté, protection contre l'incendie, réchauffeurs

**Les vannes de sécurité :** Elles sont destinées à protéger le réservoir contre les surpressions et les dépressions. Elles sont au nombre de deux (02). La vanne de sécurité pour la zone annulaire se trouve entre toit (flottant) et la robe et la vanne de décharge automatique.

**Les soupapes :** ce sont des dispositifs automatiques qui laissent s'échapper l'excédent de vapeur une fois la pression de la phase gazeuse à l'intérieur du réservoir atteint une valeur limite ou critique. Cette pression est appelée pression de tarage

**L'indicateur de niveau :** Celui-ci permet de relever le niveau du liquide dans le réservoir et au comptage du volume du produit au remplissage et ou à la vidange de celui-ci. La détermination du niveau du produit dans le réservoir se fait avec les indicateurs de niveau à flotteur qui suit le niveau du liquide. Dans le cas où il n'y aurait pas de flotteur, on détermine le niveau du produit à l'aide d'une jauge manuelle. (« D1-3\_A.pdf », s. d.)

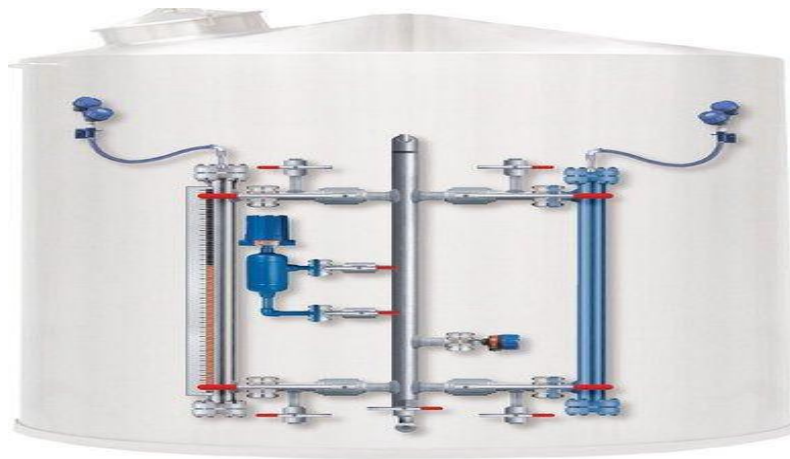


Figure. III.7 : indicateur de niveau (« D1-3\_A.pdf », s. d.)

## III-7-Cas étudié :

### III-7-1-Identification des Systèmes à étudier :

La zone de stockage du centre NAFTAL 1147 Tiaret comporte 14 bacs de stockage **08 à toit fixe** et 06 à toit flottant Figure. III. 6 d'une capacité totale de 34 570 m<sup>3</sup> contenant l'hydrocarbure. Serai par la suite acheminé par 3 pompes centrifuge pour être expédié vers la station de pompage.

### III-7-2- Construction de l'arbre de défaillance pour le feu et l'explosion de réservoir de stockage d'hydrocarbure :

Dans cette étude, le feu et l'explosion de réservoir de stockage (FERS) est considéré comme l'événement redouté (ER). Deux événements intermédiaires doivent se produire ensemble pour le feu du réservoir : « fuite d'huile et sources d'ignition », donc ils doivent être connectés au ER par une porte ET. Diverses sources d'ignition peuvent exister dans l'environnement des réservoirs de stockage : des étincelles, des étincelles statiques, feux ouverts, des étincelles de foudre, des étincelles d'appareils électriques et étincelles de courant de fuite. Chacun d'entre eux risquerait d'enflammer le mélange explosif si contacté, donc ils doivent être connectés par une porte OU. Il y a aussi de nombreuses causes qui peuvent conduire à de fuite d'huile. Ensuite, examiner cet événement comme des nouveaux événements intermédiaires, puis il sera développé par les événements basiques (EB). Poursuivre le développement de l'arbre de défaillance jusqu'à ce que toutes les branches résiliées par les événements de base ou sous-développées (tous les événements sont répertoriés dans le tableau III.2. Enfin, un arbre de défaillance complet

du (FERS) est réalisé comme il est montré dans la Figure.III .8. L'arbre de défaillance proposé comprend 41 évènements basiques qui contribuent à l'apparition de l'accident.

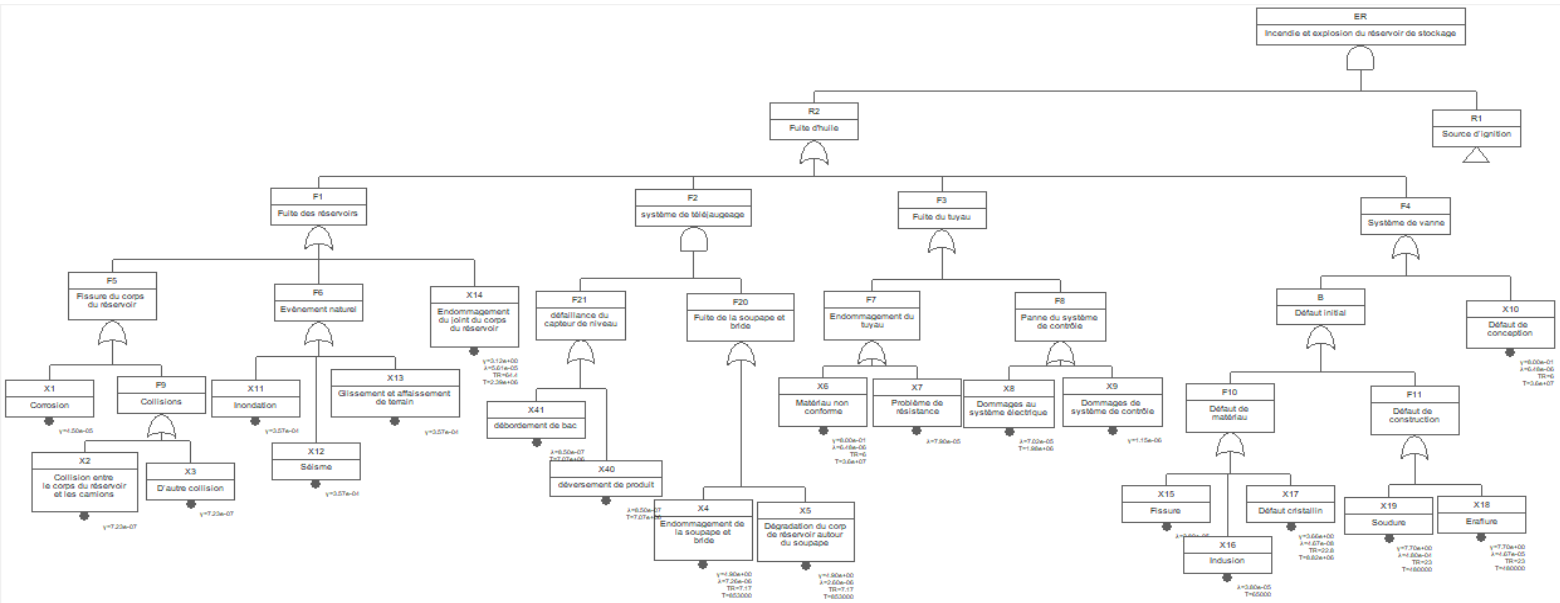


Figure. III .8: L'arbre de défaillance Incendie et explosion du réservoir de stockage

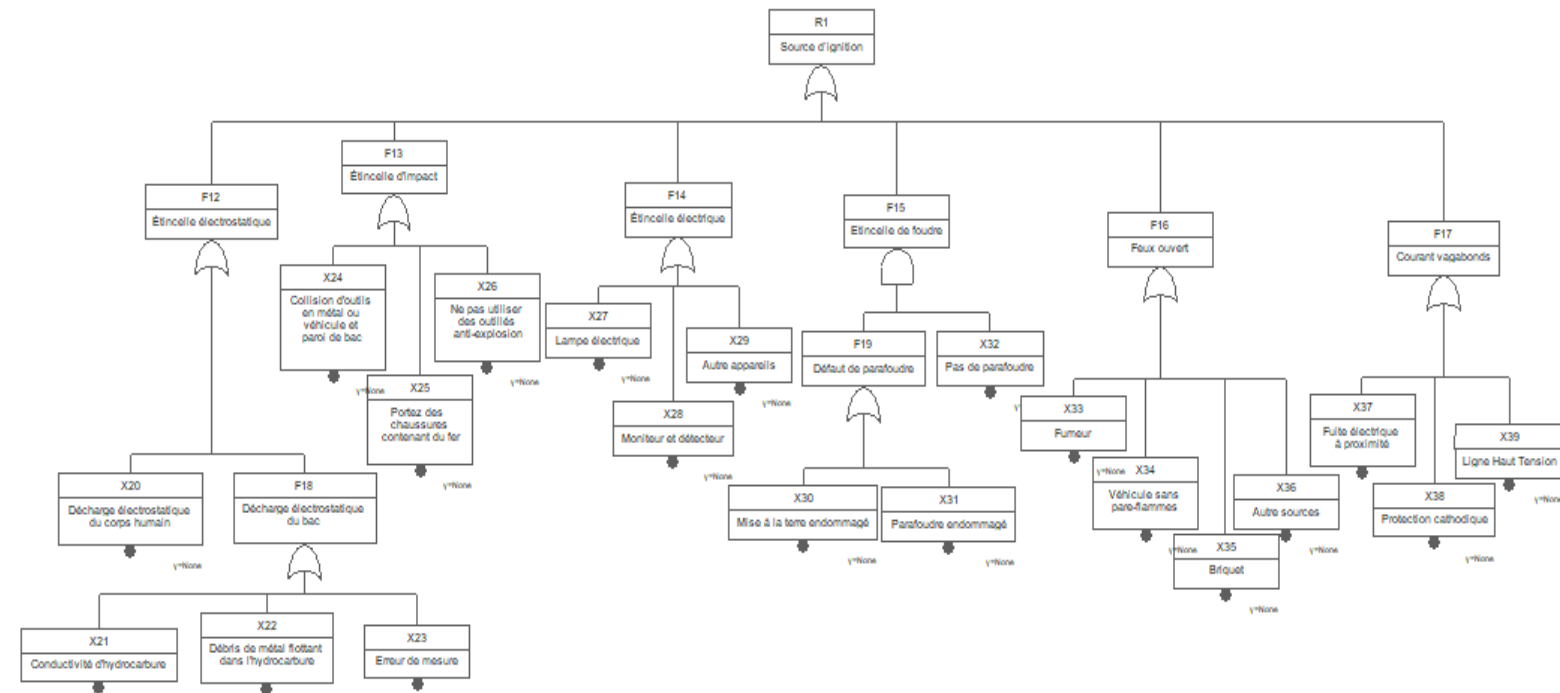


Figure. III .8 : A continué



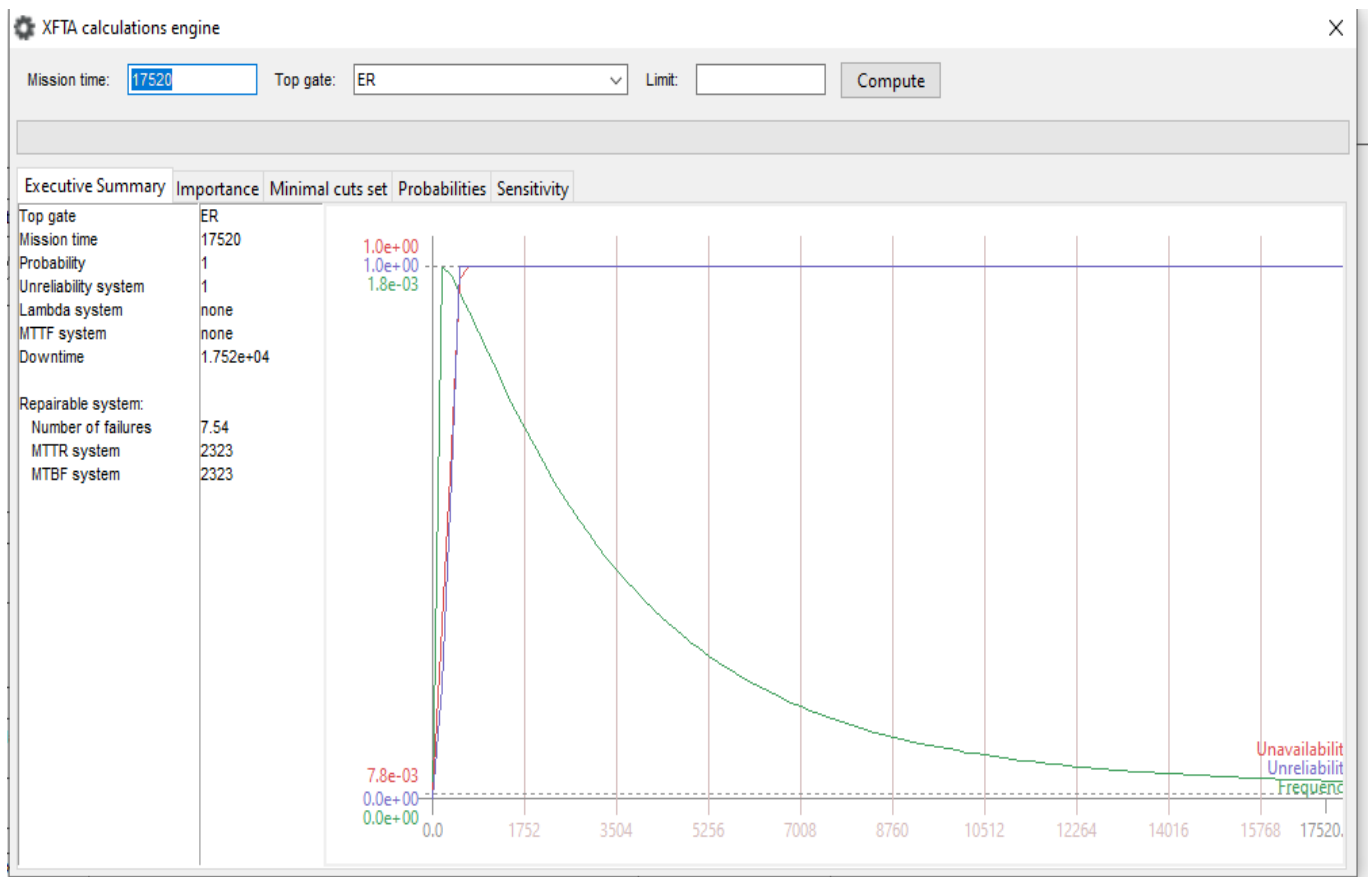
Symbole	Événements	Symbole	Événements	Symbole	Événements	Symbole	Événements
ER	Incendie et explosion du réservoir de stockage	F17	Courant vagabonds	X18	Eraflure	F11	Défaut de construction
R2	Fuite d'huile	F18	Décharge électrostatique du bac	X19	Soudure	F12	Étincelle électrostatique
R11	Source d'ignition	F19	Défaut de parafoudre	X20	Décharge électrostatique du corps humain	F13	Étincelle d'impact
B	Défaut initial	X1	Corrosion	X21	Conductivité d'hydrocarbure	F14	Étincelle électrique
F1	Fuite des réservoirs	X2	Collision entre le corps du réservoir et les camions	X22	Débris de métal flottant dans l'hydrocarbure	F15	Étincelle de foudre
F2	Fuite de la soupape de ventilation	X3	D'autre collision	X23	Erreur de mesure	F16	Feux ouvert
F3	Fuite du tuyau	X4	Endommagement de la soupape de ventilation	X24	Collision d'outils en métal ou véhicule et paroi de bac	X38	Protection cathodique
F4	Système de vanne	X5	Dégradation du corps de réservoir autour du soupape	X25	Portez des chaussures contenant du fer	X12	Séisme
F5	Fissure du corps du réservoir	X6	Matériau non conforme	X26	Ne pas utiliser des outillés anti-explosion	X13	Glissement et affaissement de terrain
F6	Evènement naturel	X7	Problème de résistance	X27	Lampe électrique	X14	Endommagement du joint du corps du réservoir
F7	Endommagement du tuyau	X8	Dommmages au système pompe électrique	X28	Moniteur et détecteur	X15	Fissure
F8	Panne du système de contrôle	X9	Dommmages de système de contrôle	X29	Autre appareils	X16	Indusion
F9	Collisions	X10	Défaut de conception	X30	Mise à la terre endommagé	X17	Défaut cristallin
F10	Défaut de matériau	X11	Inondation	X31	Parafoudre endommagé	X40	déversement de produit
X34	Véhicule sans pare-flammes	X36	Autre sources	X32	Pas de parafoudre	X39	Ligne Haut Tension
X35	Briquet	X37	Fuite électrique à proximité	X33	Fumeur	X41	débordement de bac

**Tableau. III. 2** Tous les événements de l'arbre de défaillance

## III -8- Analyse de l'ADD :

L'expérience est lancée pour **17520h** de travail car cette durée correspond à durée entre les 2 derniers control périodique de système et sous système de la zone du centre NAFTAL de Tiaret, nous récupérons les paramètres de fiabilité la base de données OREDA pour remplir le manque de données lorsque nous n'avons pas les probabilités d'occurrence précisé de tous les réelles propres au cas d'étude.

L'analyse par arbre de défaillance a été réalisée pour la quantification du risque de l'événement redouté (incendie et explosion de bac) et ses conséquences afin d'avoir des probabilités des nœuds parent comme des informations apriori.

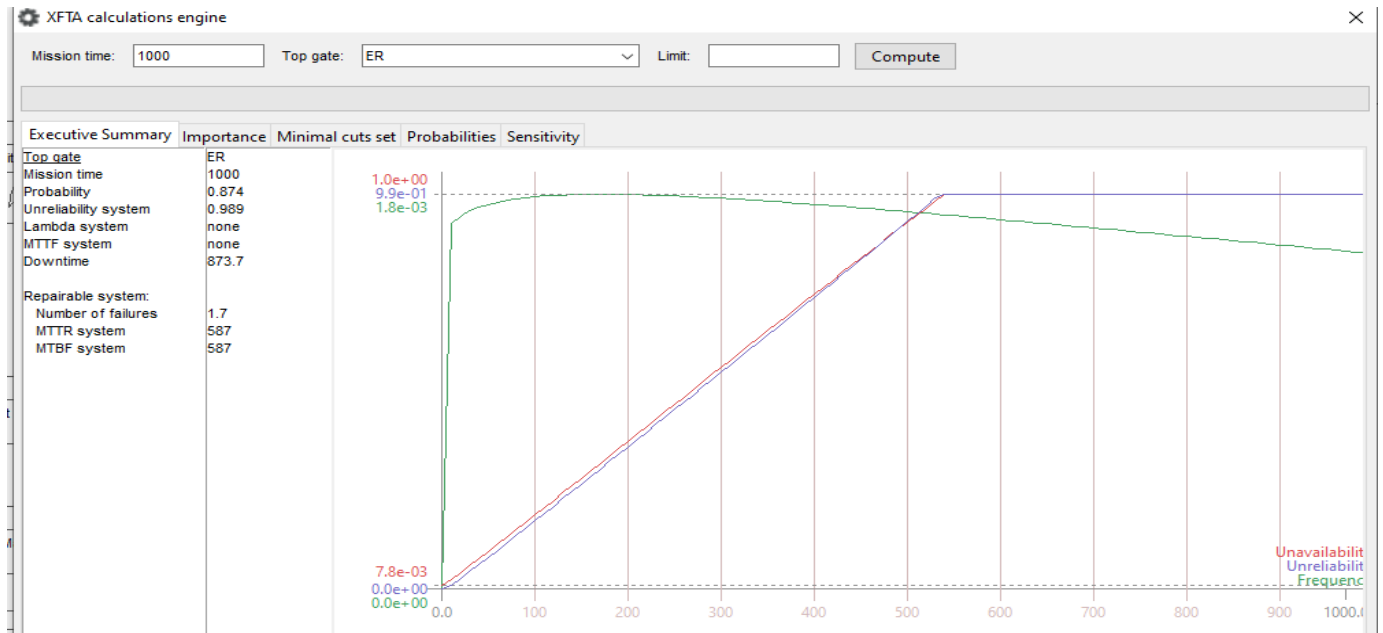


**Figure. III.9 :** Graphe d'indisponibilité du système

Après 17520h de travail le système est considéré comme non disponible après 7,54 défaillances. L'indisponibilité de départ est de 7,8 E-3.

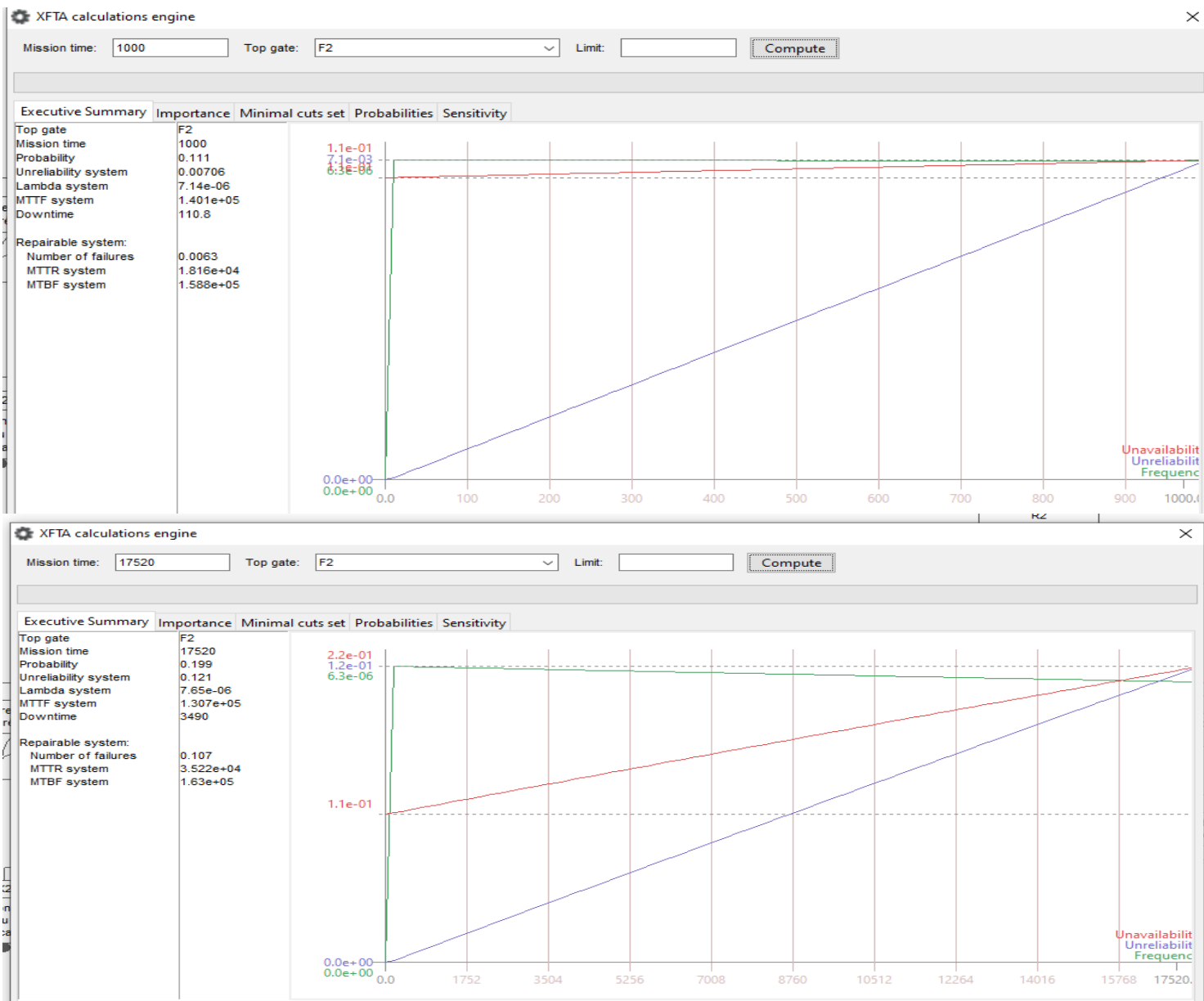
Ainsi nous relançons l'expérience avec **1000h** de travail :

L'infiabilité suit une ligne quasi linéaire. Le système est défaillant après 587h de travaille.



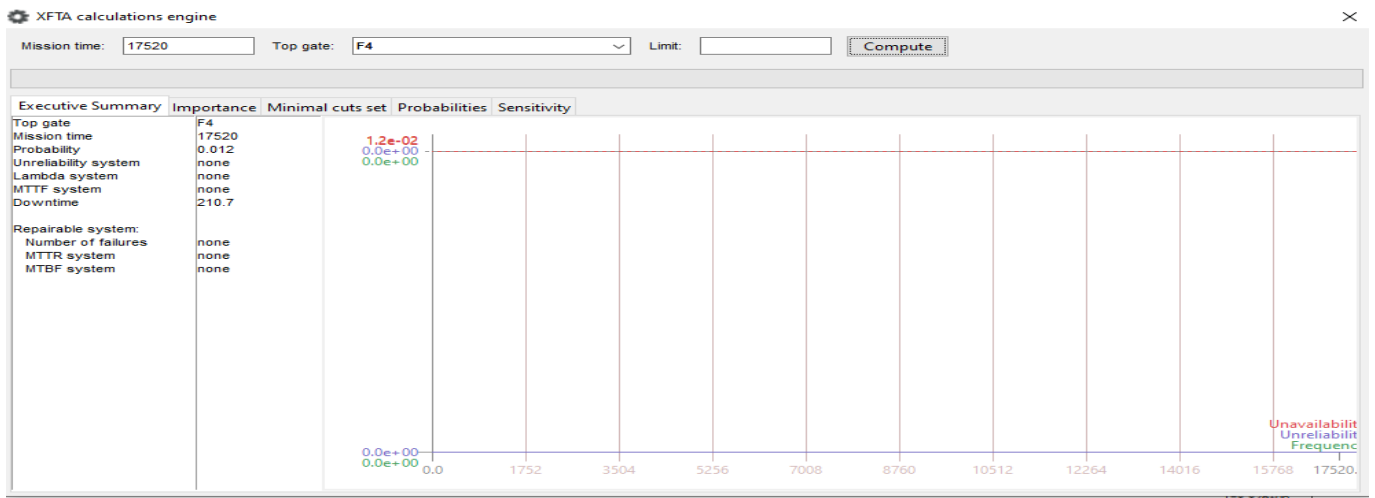
**Figur. III. 10:** Graphe d'indisponibilité du système (2)

Le système de télé-jaugeage donne une infiabilité linéaire Ceci se justifie par le fait que c'est un système basé principalement sur des composants électroniques non réparables.



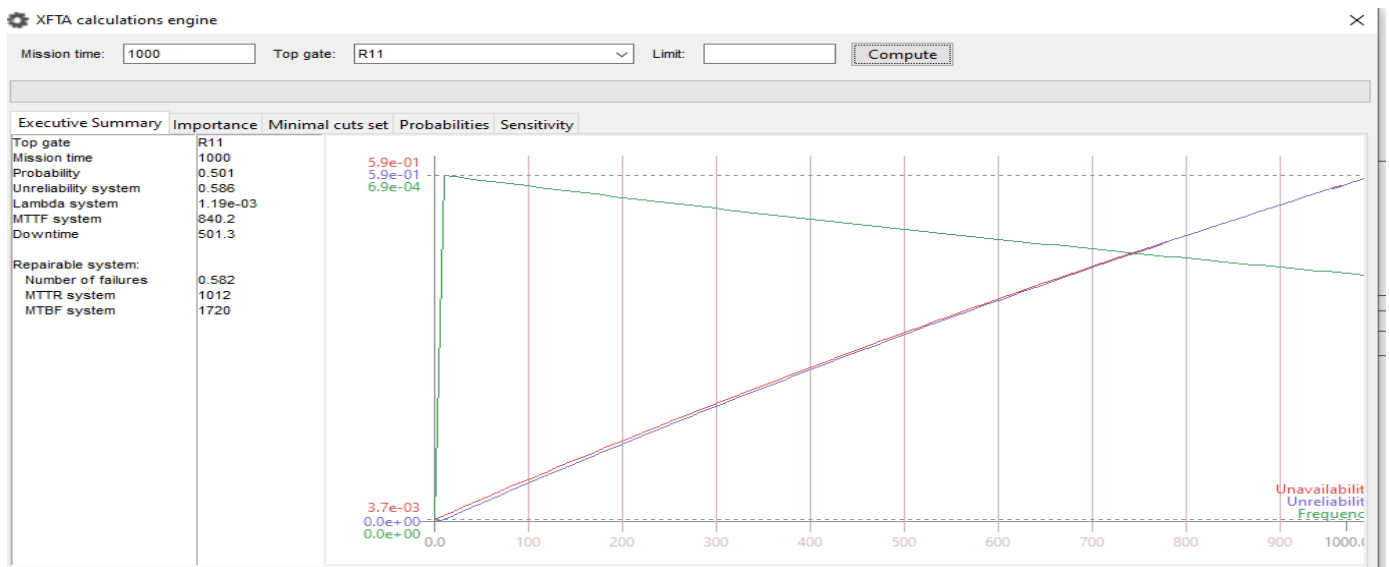
**Figure. III.11 :** Graphe d’indisponibilité du système de télé-jaugeage à 1000h ensuite à 17520h

Le système de vannes représente un cas particulier de notre système, car il représente une probabilité d’occurrence constante ceci est du au fait que les evenements causes sont considérés comme des defaux de conception . Il a une probabilité d’occurrence de 0,012.



**Figure. III.12:** Graphe d'indisponibilité et d'infirabilité du système de vannes

Et la probabilité qu'une ignition de feu se produise après 1000h de travail est de 0,5 avec une probabilité croissante.



**Figure. III.13** Graphe d'indisponibilité et d'infirabilité du système(3)

D'après ces analyses, nous pouvons dire que l'évènement redouté à de fortes chances de se produire causant l'indisponibilité du système, de ce faite une analyse des causes et des recommandations doivent être présentées.

Pour ce faire une analyse par l'approche Bayésiennes sera entamée dans la section suivante.

### III -8-1- Coupes minimales et leurs importances :

La structure de l'arbre de défaillance comme étant complexe, elle représente 399 coupes minimales où la plupart des coupes minimales sont (288) d'ordre 2 contribuent dans l'occurrence du l'incendie ou l'explosion avec 8 coupes d'ordre 4 et 107 coupes d'ordre 3.

Ordre	Nombre	Exemples
coupes minimales sont d'ordre 2	<b>288</b>	{X37 ; X8}
coupes minimales sont d'ordre 3	<b>107</b>	{X37 ; X41 ; X5}
coupes minimales sont d'ordre 4	<b>8</b>	{X31 ; X32 ; X4 ; X41}

**Tableau. III.3:** coupes minimales contribuent dans l'événement redouté à t = 17520 h avec exemple

Cela signifie que si tous les événements de base de n'importe quelle coupe minimale se produisent, l'accident d'incendie et/ou d'explosion se produit. Donc, pour un gestionnaire, il doit empêcher tous les événements d'un ensemble de coupures se sont produits en même temps. Il peut fournir la base de la mesure préventive.

### III -8-2- Facteurs d'importances probabilistes :

Suite à une analyse des données obtenues par les approches précédentes, des événements ont été retenus pour étudier leurs contributions dans l'indisponibilité du système par le modèle facteur d'importance probabiliste. Ces événements sont dommages au système pompe électrique(X8), fuite électrique à proximité (X37), débordement de bac(X41), déversement de produit(X40), dégradation du corp de réservoir autour du soupape(X5), endommagement de la soupape de ventilation(X4), pas de parafoudre(X32), parafoudre endommagé(X31).

Ordre	Nombre	La grande probabilité	Exemples de la coupe avec la grande probabilité
D'ordre 2	288	0.138737	{X37 ; X8}
D'ordre 3	107	2.57994e-006	{X37 ; X41 ; X5}
D'ordre 4	08	2.21545e-011	{X31 ; X32 ; X4 ; X41}

**Tableau. III.4:** Les facteurs d'importances contribuent dans l'événement redouté avec la grande coupe minimale dans chaque ordre et sa probabilité à t = 17520 h

## **III- 10- Conclusion :**

Dans ce chapitre nous avons présenté le centre 1147 NAFAL de Tiaret, ces installations et ces activités. Nous avons choisi le bac de stockage a toit fixe comme cas a étudié établie par l'utilisation de l'arbre de défaillance afin d'obtenir des résultats qui seront utilisés comme étant des données à priori dans le chapitre suivant pour établir un réseau bayésien d'aide à la décision.

### IV.1 Introduction :

Plusieurs études à travers le temps ont démontré la similitude entre l'arbre de défaillance et les réseaux bayésiens afin d'établir des algorithmes capables de convertir l'arbre de défaillance issue des méthodes classique vers les réseaux bayésiens parmi les méthodes les plus efficaces et les plus utilisées dans le domaine d'intelligence artificielle afin de promouvoir un outil d'aide à la décision portant sur des événements rares ou incertains en temps réel pour des études de sûreté de fonctionnement plus approfondies. Par conséquent, n'importe quel AdD correspond à un RB et toute technique appliquée à un AdD peut être réalisée dans un RB.

Dans ce chapitre nous montreront comment un AdD peut être converti en un RB. En plus de cela, on fait l'analyse d'une installation de stockage (bac a toit fixe) par le biais des RB ainsi que le calcul de la probabilité a posteriori sachant que des composants sont défectueux.

### IV-2-Réseaux bayésiens RB :

Les réseaux bayésiens sont un formalisme de modélisation probabiliste, ils sont formés d'un graphe orienté sans circuit dans lequel les nœuds représentent les variables d'un système et les arcs représentent les dépendances et les liens entre les variables. Un RB est donc un graphe causal auquel on a associé une représentation probabiliste sous-jacente. Cette représentation permet de rendre quantitatifs les raisonnements sur les causalités que l'on peut faire à l'intérieur du graphe. (« 2008\_GHOSTINE\_R » s. d.)

Un graphe orienté est défini par un ensemble de nœuds  $\{X_1, X_2, \dots, X_N\}$  et par un ensemble de liens dirigés entre des couples de nœuds; un nœud  $X_1$  est dit parent du nœud  $X_2$  si un lien dirigé  $X_1 \rightarrow X_2$  existe; un nœud  $X_2$  est dit descendant du nœud  $X_1$  si un le chemin dirigé qui commence à  $X_1$  et se termine à  $X_2$  existe; si un tel chemin n'existe pas le nœud  $X_2$  est dit non descendant du nœud  $X_1$ ; un chemin dirigé d'un nœud à lui-même est appelé un cycle dirigé; un graphe orienté contenant aucun cycle dirigé n'est appelé graphe acyclique dirigé [ Directed Acyclic Graph (DAG)].

Afin de définir un réseau bayésien, deux éléments sont nécessaires : un ensemble de variables aléatoires  $V = \{X_1, X_2, \dots, X_N\}$  et un DAG dont les nœuds correspondent aux variables aléatoires dans  $V$  ; notez que, puisqu'il n'y a pas de risque d'ambiguïté, nous

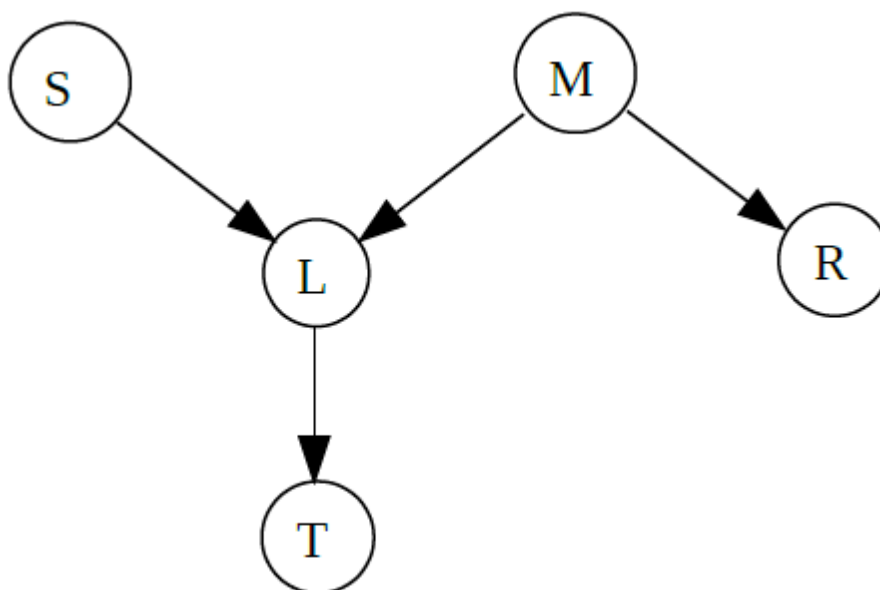


utilisons le symbole  $X_i$  pour désigner à la fois la variable aléatoire et au nœud correspondant. De plus, la distribution de Probabilité Distribution Fonction (PDF)  $P(X_1, X_2, \dots, X_N)$  doit satisfaire la condition de Markov, c'est-à-dire chaque variable aléatoire  $X_i$  et l'ensemble de tous ses non-descendants doivent être conditionnellement indépendant, étant donné l'ensemble de tous ses parents. Cela peut être prouvé pour variables discrètes (ce qui s'avère être notre cas) que la condition de Markov permet facilement de calculer le PDF conjoint comme :

$$P(X_1, X_2, \dots, X_N) = \prod_{i=1}^N P(X_i | \text{Pai})$$

Où  $\text{Pai}$  est l'ensemble des variables aléatoires dont les nœuds correspondants sont les parents du nœud  $X_i$ .

Les deux liens dirigés apparaissant dans le DAG et les valeurs des probabilités conditionnelles  $P(X_i | \text{Pai})$  peuvent être appris à partir d'un ensemble de données dont les enregistrements maintiennent les valeurs prises par chaque  $X_i$  dans des expériences indépendantes. (Vogel, s. d.)



**Figure IV.1:** Exemple d'un réseau bayésien (« 13.5: Bayesian Network Theory » 2020)

### IV-3-Etapes de modélisation d'un réseau bayésien :

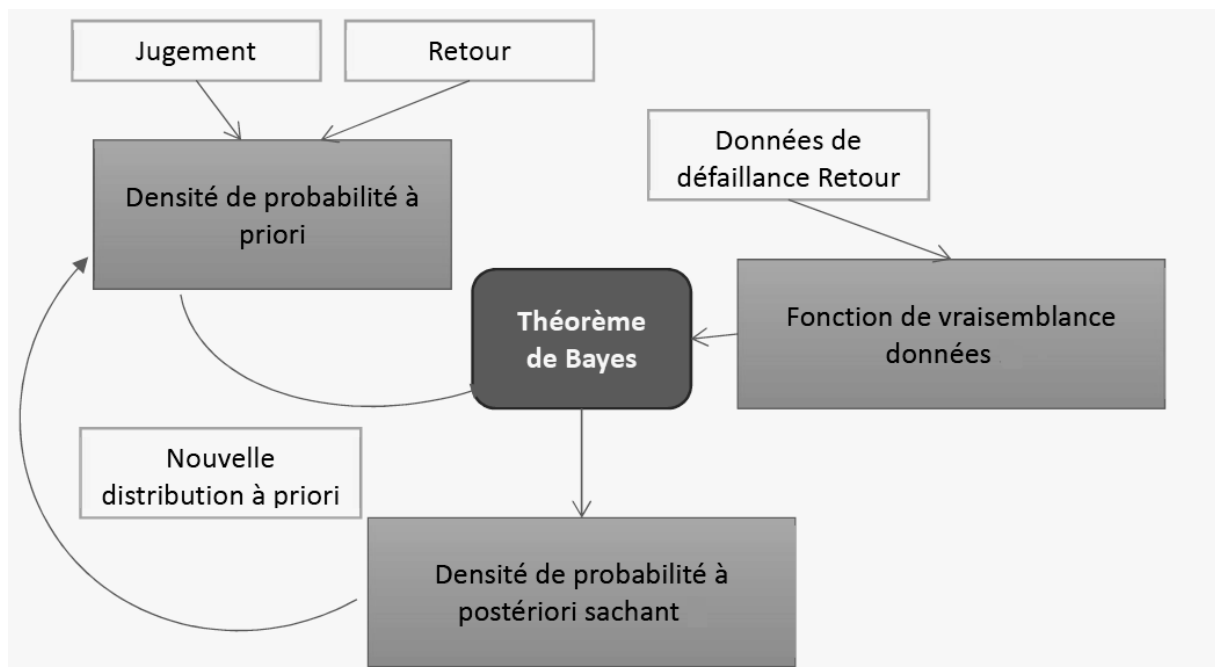
Il y a deux étapes principales pour la modélisation de RB :

1. Construire la structure du RB, soit en utilisant nos connaissances antérieures, soit en utilisant un algorithme d'apprentissage de structure à partir d'un ensemble de données de formation ;
2. Pour déterminer la table de probabilités conditionnelles de chaque nœud dans la structure de RB, encore une fois en utilisant notre connaissance préalable ou un algorithme d'apprentissage de paramètres. Une fois que les TPC du RB sont appris, le RB peut être appliqué pour calculer les distributions de probabilité postérieures données en preuve, ce qu'on appelle l'inférence probabiliste ou la mise à jour des croyances (« Korb et Nicholson, 2004 », s. d.)

### IV-4-Le mécanisme d'inférence :

L'utilisation essentielle des réseaux bayésiens est donc de calculer des probabilités conditionnelles d'événements reliés les uns aux autres par des relations de cause à effet. Le processus d'inférence comporte les étapes suivantes :

- choix d'un modèle relatif aux données : distribution conditionnelle. La distribution conditionnelle appartient à une famille de lois de probabilité.
- détermination d'une distribution à priori du paramètre de la loi conditionnelle, pour intégrer des informations subjectives. Elle est établie à partir des connaissances que l'on a sur le matériel étudié : essais antérieurs sur le matériel similaire, avis d'experts, retour d'expérience, enquête, etc.
- obtention de la distribution a posteriori par application du théorème de Bayes qui permet de combiner l'information subjective et l'information objective contenue dans l'échantillon.
- estimation du paramètre de fiabilité étudiée (taux de défaillance par exemple) déduite de la distribution a posteriori. (« ActualisationBayes.pdf », s. d.)



**Figure IV.2 :** Le mécanisme d'inférence bayésienne (« ActualisationBayes.pdf », s. d.)

## IV-5-Difficultés dans l'utilisation des réseaux bayésiens :

L'utilisation essentielle des réseaux bayésiens est de calculer des probabilités conditionnelles d'événements reliés les uns aux autres par des relations de cause à effet. Cette utilisation s'appelle l'inférence.

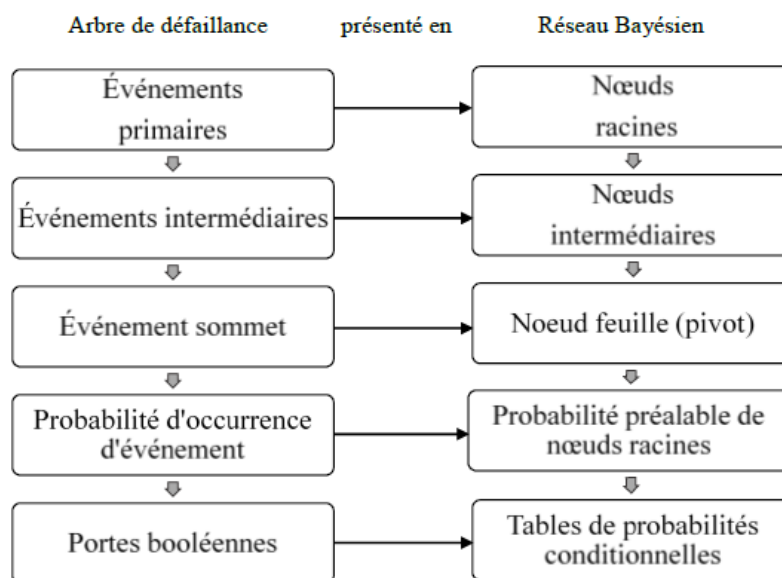
La correspondance qui existe entre la structure graphique et la structure probabiliste associée va permettre de ramener l'ensemble des problèmes de l'inférence à des problèmes de théorie des graphes.

Cependant, ces problèmes restent relativement complexes, et donnent lieu à de nombreuses recherches.

Une difficulté essentielle des réseaux bayésiens se situe précisément dans l'opération de transposition du graphe causal à une représentation probabiliste. Même si les seules tables de probabilités nécessaires pour définir entièrement la distribution de probabilité sont celles d'un nœud conditionné par rapport à ses parents. Il reste que la définition de ces tables n'est pas toujours facile pour un expert.(Mouss, s. d.)

**IV-6-Interprétation de AdD en RB :**

Pour passer de AdD à un RB, nous avons utilisé un algorithme de cartographie comprenant des tâches graphiques et numériques. Dans la partie graphique, EB, EI et ER de l'AdD sont représentés sous forme de nœuds racines, de nœuds intermédiaires et de nœuds pivots dans le RB. Les nœuds dans un RB sont connectés de la même manière que les composants correspondants d'AdD. Dans la partie numérique, l'occurrence de probabilités des EB est affectée aux nœuds racines correspondants comme des probabilités à priori. Pour chaque nœud intermédiaire et nœud enfant, une TPC est développée. La TPC est développée en fonction du type de porte logique. La figure IV.3 montre la procédure simplifiée de passage d'AdD à RB.(« Bobbio, A., 2001.pdf » s. d.)



**Figure IV.3 :** montre la procédure simplifiée de passage d'AdD à RB

Après modélisation de l'arbre sous forme d'un réseau bayésien les probabilités a priori et les probabilités conditionnelles de chacun des nœuds sont définies. Les probabilités marginales de chaque variable sont calculées par inférence.

Les tables de probabilités conditionnelles (TPC) associées aux différents nœuds du réseau sont définies par la fonction logique OU/ET. L'expert du système précise que c'est le mode de raisonnement qui est appliqué. Si plusieurs causes sont concomitantes, chacune est isolée de manière unique et fait l'objet d'un retour dans le REX (les données obtenues par retour d'expérience).

La quantification des probabilités est réalisée grâce aux connaissances de l'expert du système industriel. Pour chacun des modalités des nœuds, les appréciations de l'expert sont transposées en valeurs numériques des probabilités. (Mechri, Simon, et Morel 2017)

Les Tableaux IV.1 et IV.2 présentent les tables de probabilité conditionnelles des portes logiques 'ou', 'et', respectivement.

La méthode de conversion peut être étendue aux AdD avec d'autres portes et les TPC des réseaux correspondants suivront les tables logiques des portes.

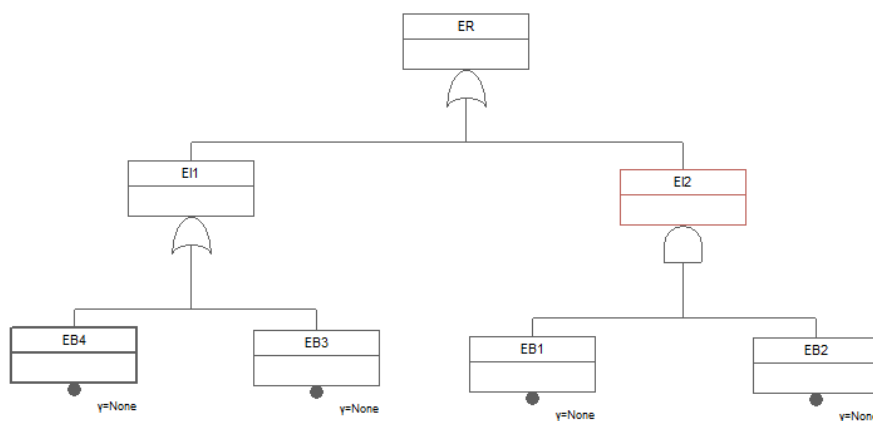


Figure IV.4 : Exemple de Structure d'AdD

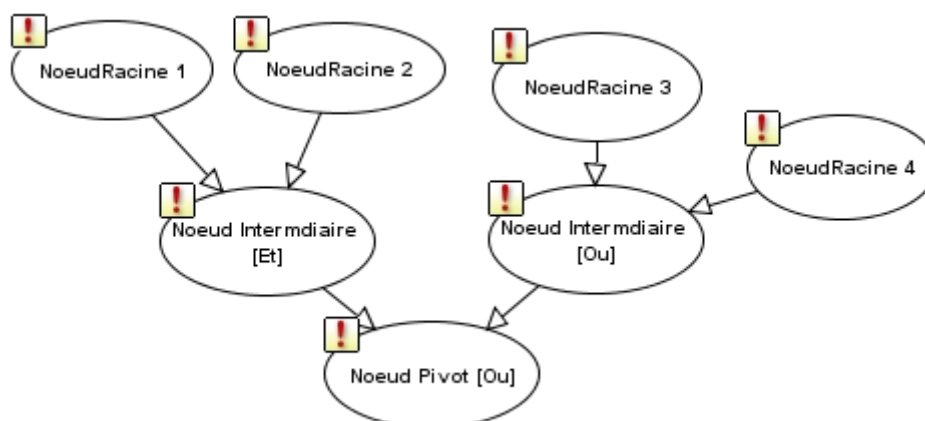


Figure IV.5 : Structure du réseau bayésien obtenu à partir de la Figure IV.4

Noeud Racine 3	Noeud Racine 4	P (Noeud Intermédiaire [Ou]=0)	P (Noeud Intermédiaire [Ou]=1)
0	0	1	0
0	1	0	1
1	0	0	1
1	1	0	1

**Tableau IV.1 :** TPC de la porte logique « Ou »

Noeud Racine 1	Noeud Racine 2	P (Noeud Intermédiaire [ET]=0)	P (Noeud Intermédiaire [ET]=1)
0	0	1	0
0	1	1	0
1	0	1	0
1	1	0	1

**Tableau IV.2 :** TPC de la porte logique « et »

### IV-7-Présentation de AgenaRisk :

AgenaRisk © (site) est un outil visuel, de modélisation des risques et de prédiction d'événements incertains. AgenaRisk nous permet de réaliser le réseau bayésien, de calculer facilement les probabilités à partir des données, des statistiques ou des expériences vécus.(« AgenaRisk\_User\_Manual.pdf », s. d.)

En particulier, AgenaRisk :

- Aide à analyser l'incertitude et à prendre de meilleures décisions
- Combine les avantages des réseaux bayésiens, de la simulation statistique et de l'analyse de type tableur.
- Est visuel, facile à utiliser, intuitif et puissant.

### IV-7-A-Domaine d'utilisation :

#### IV-7-A-1-Secteur de l'industrie :

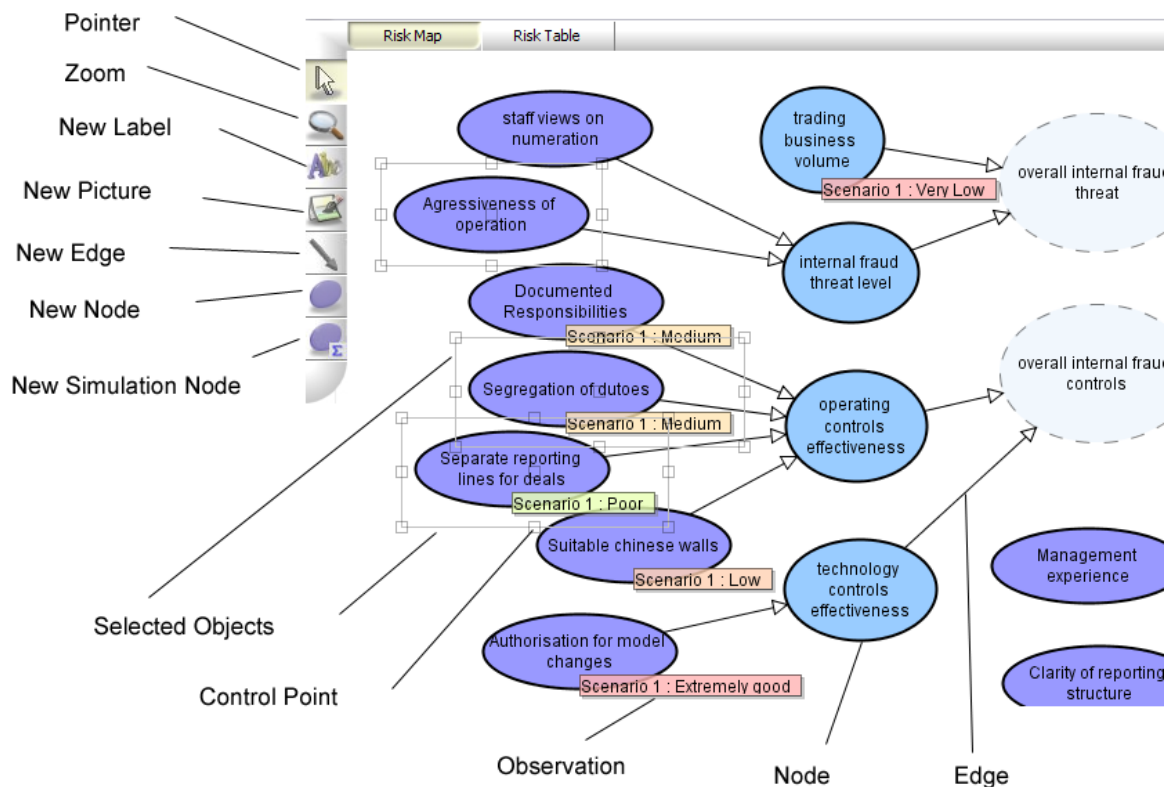
Agenarisk a été utilisé par certaines des principales organisations mondiales pour modéliser les risques et améliorer la prise de décision dans une gamme de secteurs industriels, notamment : L'aérospatiale, les banques, la défense, l'énergie et l'environnement, la santé, la technologie, les télécommunications, le transport.

#### IV-7-A-2-Le mode d'utilisation d'AgenaRisk :

AgenaRisk est une variation nouvelle de la méthode bayésienne. C'est un logiciel intuitif où

la réalisation du réseau ne nécessite pas une connaissance approfondie de la théorie Bayésienne. Les utilisateurs d'AgenaRisk devront juste être capables de construire le réseau bayésien selon les normes du logiciel.

Le réseau bayésien est composé des nœuds qui représentent les paramètres des statistiques ou des expériences, et des liaisons qui représentent la relation entre ces paramètres.



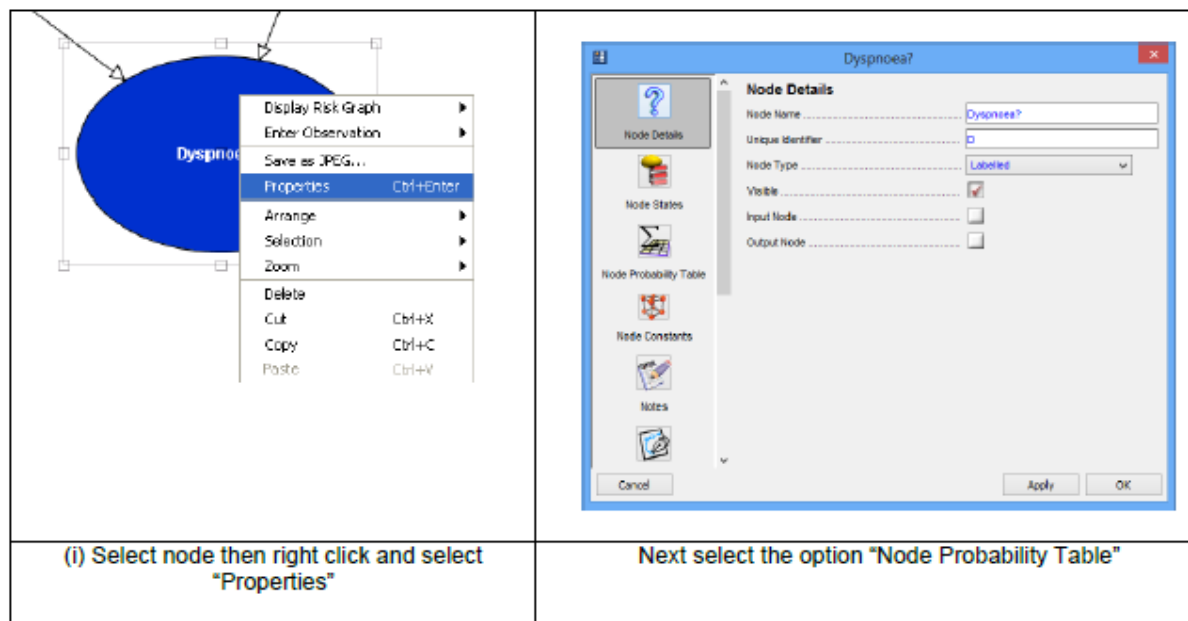
**Figure IV.6:** exemple d'un réseau bayésien présenté sur AgenaRisk

(« AgenaRisk\_User\_Manual.pdf », s. d.)

### Propriétés des nœuds :

Les nœuds doivent être identifié par :

- Le nom de paramètre étudié
- Le titre unique d'identification
- Le type de nœud
- Les composants du nœud
- La table de probabilité



(i) Select node then right click and select "Properties"

Next select the option "Node Probability Table"

**Figure IV.7:** l'accès aux propriétés des nœud sur AgenaRisk

(« AgenaRisk\_User\_Manual.pdf », s. d.)

**IV-8 -Comment remplir les probabilités des EB dans le RB :**

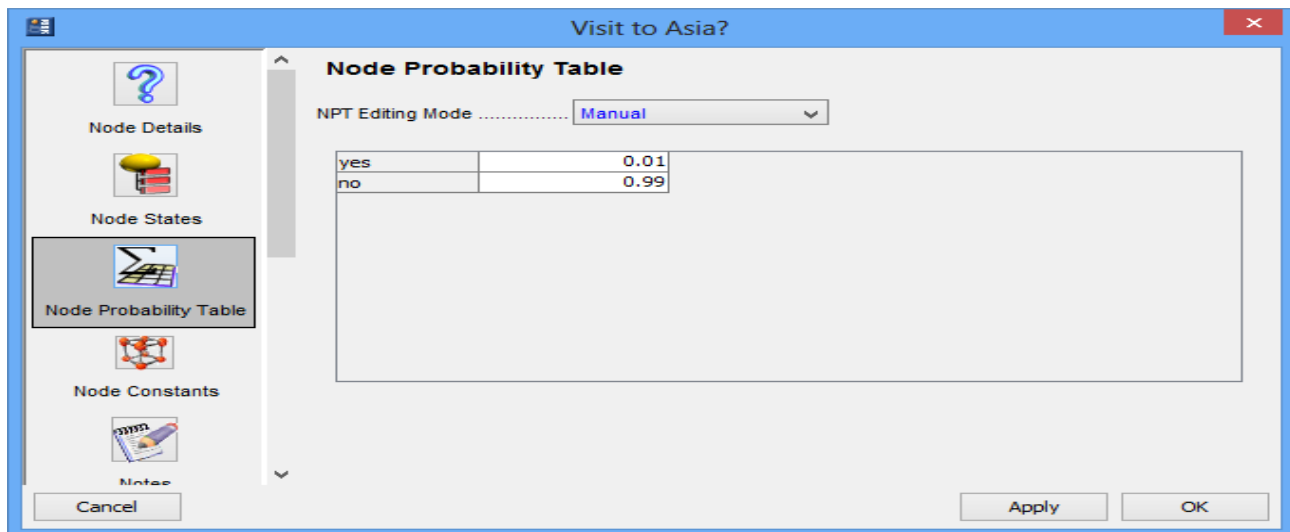
Dans un RB nous pouvons avoir plusieurs variables (qui sont les événements EB1, EBi, ..., EBn) qui peuvent prendre chacune la valeur « vrai » ou « faux » :

A partir de nos connaissances subjectives, nous pouvons évaluer les probabilités de certains événements. Et nous pouvons également traduire le fait, par exemple, qu'il n'y a aucun lien a priori entre le fait de l'évènement 2, et le fait de autres évènements d'où la table de probabilité suivante :

Événement	Probabilité
EB2 = vrai	0.4
EB2= faux	0.6

**Tableau IV.3 :** Exemple de Tableau des probabilités à priori



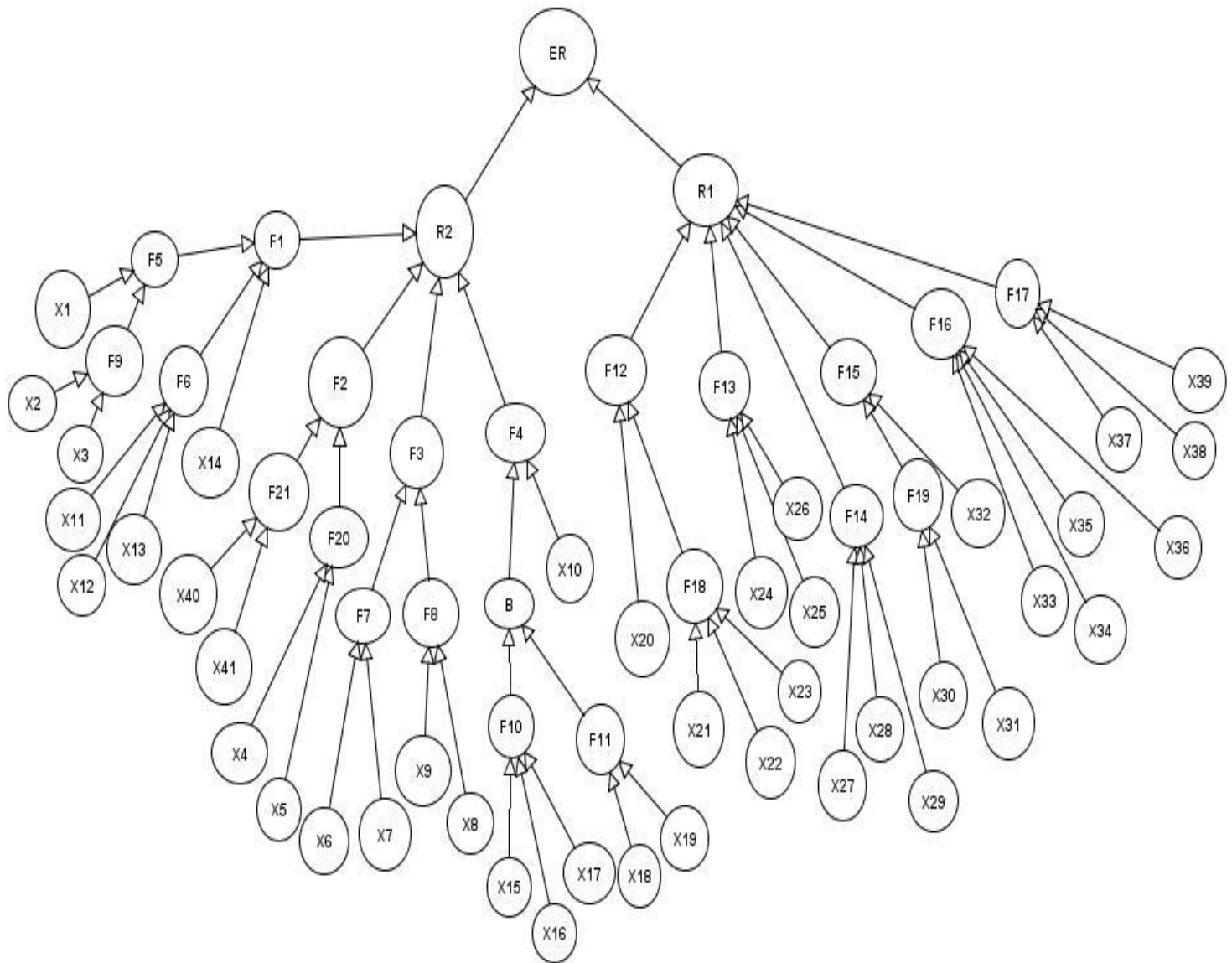


**Figure IV.8:** Tableau des probabilités à priori des nœuds parant sur AgenaRisk (« AgenaRisk\_User\_Manual.pdf », s. d.)

#### **IV-8-A-Structure du RB à partir de l'Add :**

Un réseau bayésien a été développé pour analyser de feu et l'explosion de réservoir de stockage d'hydrocarbure avec un modèle probabiliste plus performant comme le montre la Figure IV.9 à partir de l'arbre de défaillance présenté dans la Figure III.8 et sur le logiciel AgenaRisk.

Tous les événements de base dans l'arbre de défaillance sont convertis en nœuds parents. Les nœuds logiques (pivot) sont obtenus à l'aide de la table de probabilités conditionnelles. Où il y'a comme états oui et non.



**Figure IV.9 :** Structure du réseau bayésien de feu et l’explosion de réservoir d’hydrocarbure, où les nœuds parents sont présentés dans le Tableau III.2

Ce modèle (Figure IV.9) a été créé selon l’AdD du FERS. Il est utilisé pour évaluer la probabilité de défaillance pour le réservoir à toi fixe. Ce modèle a été créé à l’aide du logiciel Agenarisk 2014. Nous avons mis la probabilité d’occurrence de tous les nœuds parents (EB) dans le logiciel Agena, puis nous avons rempli les TPC des nœuds intermédiaires et ER en fonction des portes logiques dans l’AdD de FERS.

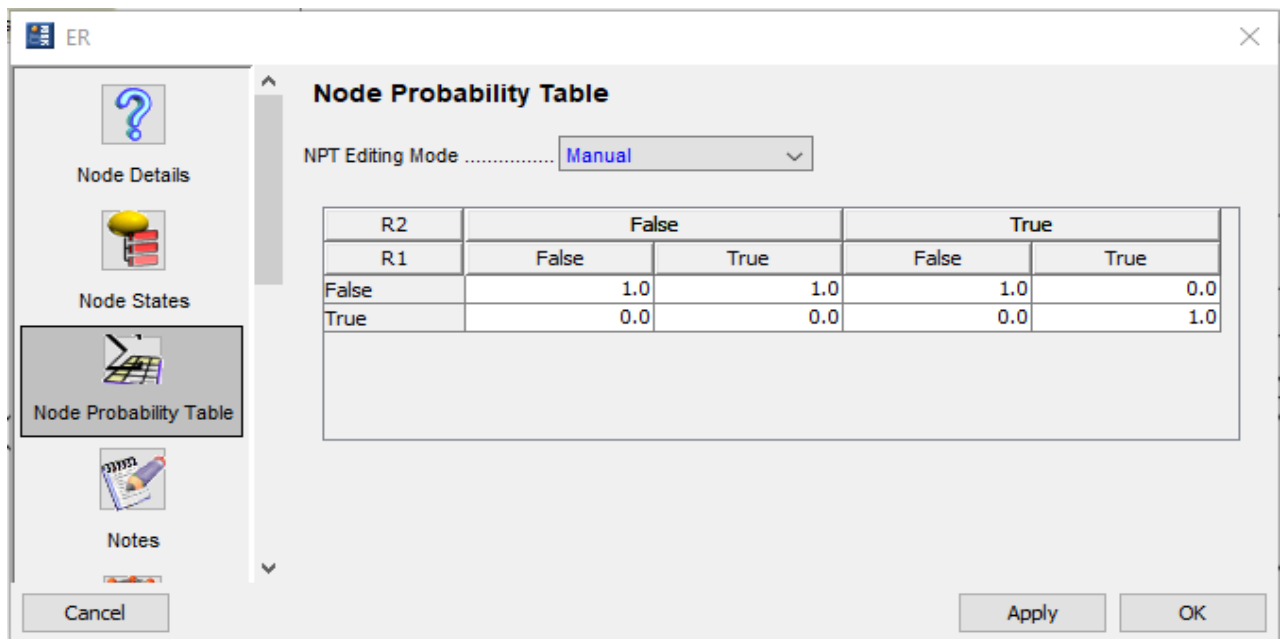


Figure IV.10 : TPC du l'événement redouté

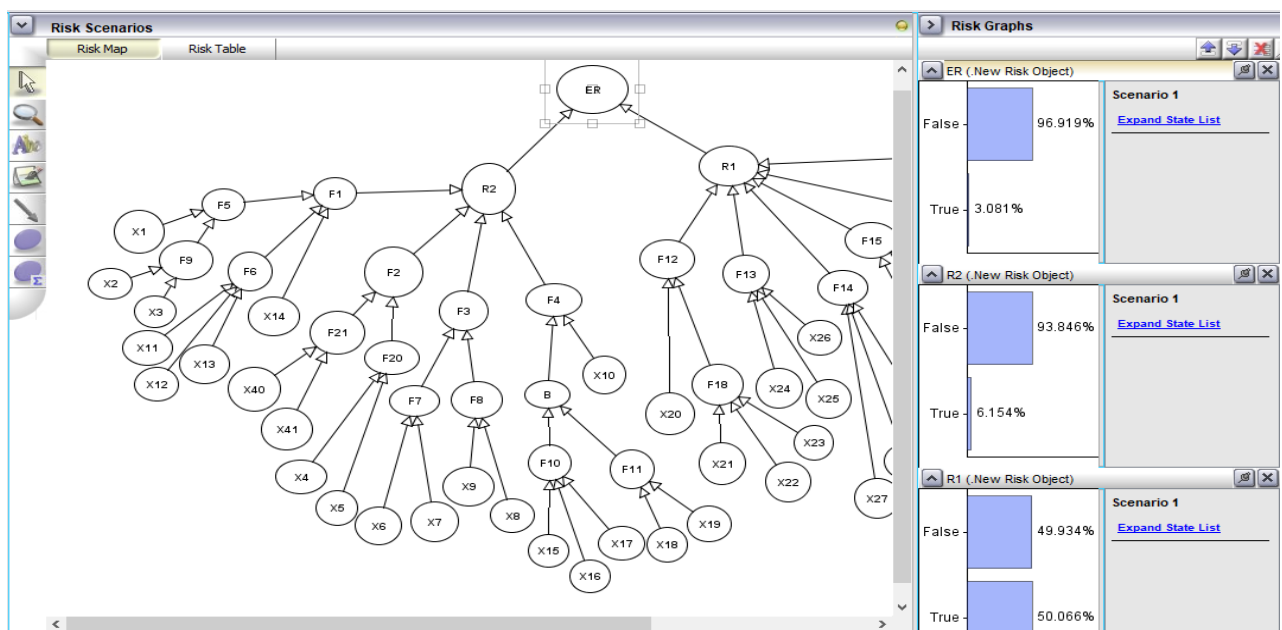


Figure IV. 11 : graph de risque démontre les valeurs de Poc de du ER, R1 et R2

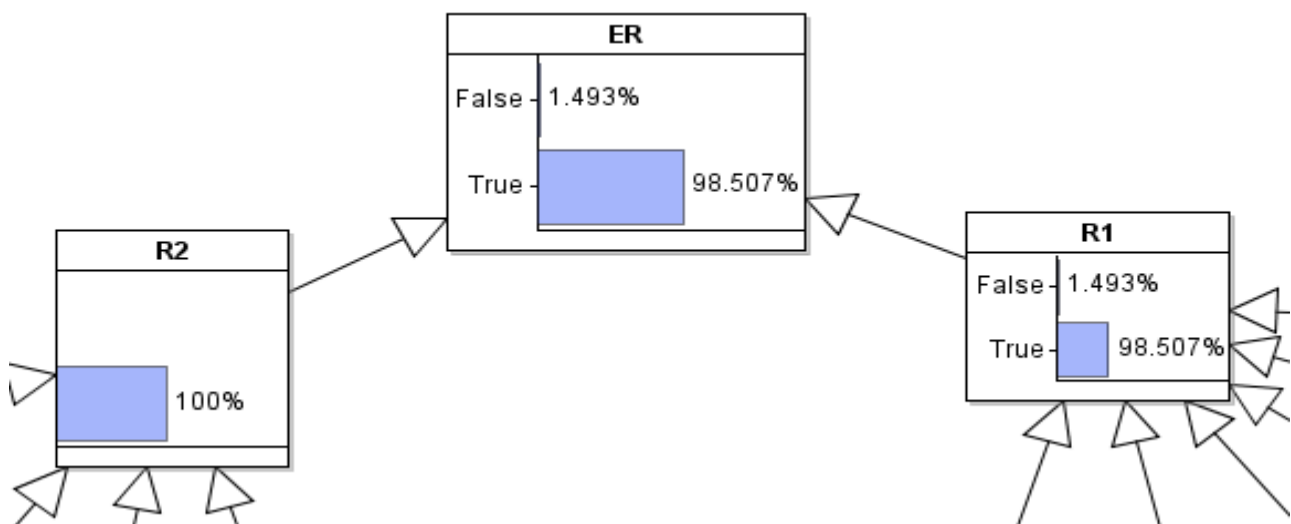
## IV-8-B- Analyse de réseau :

D'après les résultats du réseau final, nous pouvons dire que l'évènement redouté à de fortes chances de se produire causant l'indisponibilité du système (3,1%), ces résultats sont déjà significatifs pour l'entreprise mais notre but est toujours d'améliorer le niveau de sécurité, et pour cela une simulation de quelques scénarios les plus communs seront expérimentés afin de déterminer les relations entre les causes et l'évènement redouté.

La simulation des scénarios doit être appliquée sur le réseau bayésien par AgenaRisk. Elle se fait par des suppositions sur les nœuds en choisissant les événements qu'on souhaite étudier puis on observe les résultats des paramètres liés.

### IV-8-B-1- premier scénario « les feux de débordement au sol »

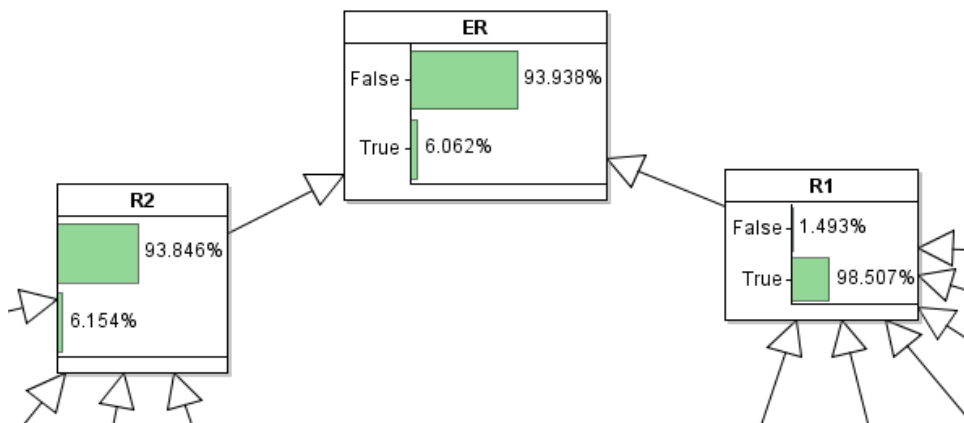
Les feux de débordement au sol sont communs aux trois principaux types de réservoirs de stockage, et peut être le résultat d'un débordement du réservoir dû à une défaillance de système de télé-jaugeage et le système des vannes ou à une erreur de l'opérateur ou aux deux.



**Figure IV. 12 :** la cause « le feu de débordement » est la plus probable avec une probabilité de 98.507%.

**IV-8-B-2- Deuxième scénario « les feux de vent »**

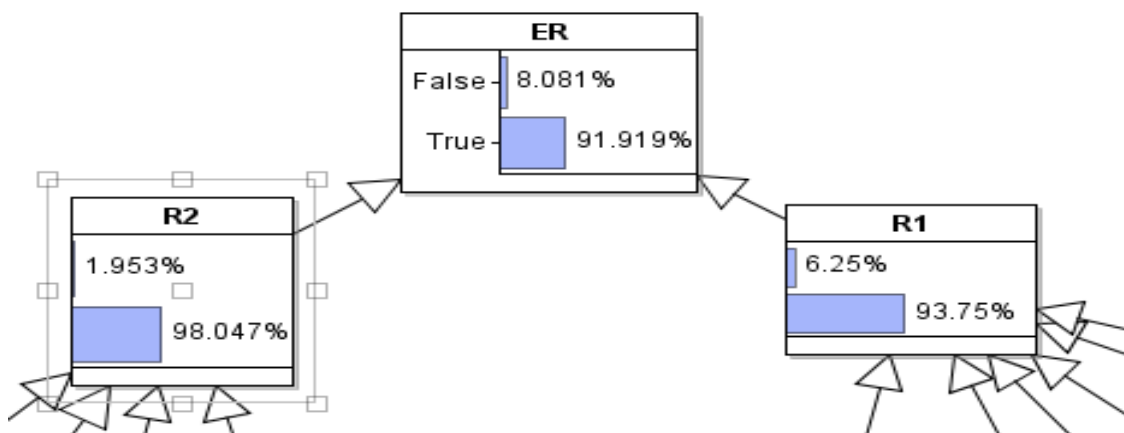
Les feux de ventilation sont associés aux réservoirs a toit fixe et aux réservoirs a toits couverts, et se produisent généralement lorsque les vapeurs d'hydrocarbures s'échappant des soupapes de ventilation en raison de l'expansion de la vapeur, qui est causée par des changements de température et de pression sont enflammées par la foudre.



**Figure IV. 13 :** la cause « le feu de ventilation » est la moins probable avec une probabilité de 6.062%.

**IV-8-B-3-troisième scénario « Incendies de joint de jante »**

Les incendies de joints de jante sont courants dans les réservoirs à toit ouvert, mais peuvent également se produire dans les réservoirs à toit couvert. Il est généralement moins difficile à supprimer à condition que le toit ne soit pas détruit par une explosion ou fait couler par déversement excessif d'eau sur le toit pendant la lutte contre l'incendie.



**Figure IV. 14 :** la cause « incendie de joints de jante » avec une probabilité de 91.919%.

### **IV-9- conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons présenté le modèle bayésien de l'évènement redouté... survenu au sein de le centre NAFTAL Zaaroura de Tiaret.

Ce réseau bayésien nous à permit d'appliquer des simulations de quelques scénarios pour comprendre l'origine et leur degrés d'implication de certains évènements redoutés notamment les incendies et explosion des réservoirs de stockage. Cette analyse nous a permis de localiser les causes de ces évènements afin d'améliorer la connaissance et la vigilance face à ces risques. Les incendies de réservoirs peuvent ne pas être fréquents, mais ils se produisent quand même.

## Conclusion générale :

L'étude réalisée dans ce mémoire porte essentiellement sur le théorème de Bayes pour pouvoir estimer la probabilité a posteriori de l'occurrence d'un événement redouté, axé sur les risques liés au stockage des hydrocarbures par les réservoirs à toit fixe. Le modèle développé dans cette mémoire fournit une image complète des risques liés aux bacs de stockage. Ce modèle est capable de prédire la probabilité et le niveau des conséquences des défaillances des composants de ces bacs. La probabilité de défaillance est calculée à l'aide d'un modèle bayésien de prédiction quantitatif basé sur l'arbre de défaillance. Le modèle prédit d'abord la probabilité de défaillance pour des sources principales de défaillance des réservoirs, puis la probabilité de l'occurrence d'une ignition et enfin la probabilité du feu et d'explosion de ses réservoirs de stockage. Les principales contributions de cette étude sont les suivantes :

- Un cadre pour élaborer des modèles d'évaluation des risques pour différents types d'infrastructure à l'aide de données existantes.
- Un modèle probabiliste fondé sur l'approche bayésienne pour prédire la probabilité de défaillance des bacs de stockage.
- L'obtention des probabilités des événements basiques du modèle de défaillance pour prévoir les conséquences en utilisant l'arbre de défaillance.
- Le modèle de prédiction de la probabilité de défaillance tient en compte l'interdépendance des événements basiques.

Le modèle développé est capable d'atteindre les objectifs souhaités, mais certains domaines sont recommandés pour être améliorés à l'avenir :

- Collecter plus de données afin de considérer l'interdépendance des sources de défaillance les uns des autres.
- Développer un modèle de prédiction de conséquences de défaillance, par exemple la quantité de produit libéré dans l'environnement basé sur un scénario de défaillance.
- Examiner les types de défauts possibles dans l'élaboration de scénarios de réadaptation. Ce modèle pourrait être capable de prédire les types de défauts qui peuvent causer la défaillance d'un réservoir de stockage et ainsi permettre de planifier l'entretien en conséquence.

## Références bibliographiques :

- 1) Module de sureté de fonctionnement Claire Pagetti - ENSEEIHT 3 -ème TR - option SE 10 d´décembre 2012.pdf, n.d.
- 2) Enspm 2005 -SÉCURITÉ DES SYSTÈMES - ANALYSE DE RISQUES MÉTHODES D´ANALYSE DE RISQUES.pdf, n.d.
- 3) ISO 31000 VERSION 2018.pdf, n.d.
- 4) Moïσιο, G., 2016. Sûreté de Fonctionnement, in: Méthodologies Appliquées.
- 5) Vose, D., 2008. Risk analysis: a quantitative guide, 3rd ed. ed. Wiley, Chichester, England ; Hoboken, NJ.
  
- 6) Gaston, Kevin J., et Professor of Biodiversity and Conservation Department of Animal and Plant Sciences Kevin J. Gaston. 2003. The Structure and Dynamics of Geographic Ranges. Oxford University Press.
- 7) Rigaux, Clémence. s. d. « Méthodes de Monte Carlo du second ordre et d´inférence bayésienne pour l´évaluation des risques microbiologiques et des bénéfiques nutritionnels dans la transformation des légumes », 208.
- 8) Robert, Christian P. 2014. « Des specificites de l´approche bayesienne et de ses justifications en statistique inferentielle ». arXiv:1403.4429 [stat], mars.  
<http://arxiv.org/abs/1403.4429>.
- 9) Rosamont, Kevin. s. d. « Modélisation incrémentale par méthode bayésienne », 126.
- 10) Zhu, Qun Ying. s. d. « Modèles bayésiens et application à l´estimation des caractéristiques de produits finis et au contrôle de la qualité », 271.
- 11) « Analyse de risques : Identification et estimation : Démarches d´analyse de risques - Méthodes qualitatives d´analyse de risques - Les concepts fondamentaux liés au risque ». s. d. Consulté le 17 octobre 2020a.  
[http://www.unit.eu/cours/cyberrisques/etage\\_3\\_aurelie/co/Module\\_Etage\\_3\\_synthese\\_3.html](http://www.unit.eu/cours/cyberrisques/etage_3_aurelie/co/Module_Etage_3_synthese_3.html).
- 12) « ——— ». s. d. Consulté le 17 octobre 2020b.  
[http://www.unit.eu/cours/cyberrisques/etage\\_3\\_aurelie/co/Module\\_Etage\\_3\\_synthese\\_3.html](http://www.unit.eu/cours/cyberrisques/etage_3_aurelie/co/Module_Etage_3_synthese_3.html).
- 13) « Analyse de risques : Identification et estimation : Démarches d´analyse de risques - Méthodes qualitatives d´analyse de risques - Méthode du Diagramme de Succès ou de Fiabilité ». s. d. Consulté le 23 octobre 2020.



- [http://www.unit.eu/cours/cyberrisques/etage\\_3\\_aurelie/co/Module\\_Etage\\_3\\_synthese\\_37.html](http://www.unit.eu/cours/cyberrisques/etage_3_aurelie/co/Module_Etage_3_synthese_37.html).
- 14) « Chaîne de Markov ». 2020. In Wikipédia.  
[https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Cha%C3%A9ne\\_de\\_Markov&oldid=174343682](https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Cha%C3%A9ne_de_Markov&oldid=174343682).
  - 15) « ActualisationBayes.pdf ». s. d.
  - 16) « 13.5: Bayesian Network Theory ». 2020. Engineering LibreTexts. 19 mai 2020.  
[https://eng.libretexts.org/Bookshelves/Industrial\\_and\\_Systems\\_Engineering/Book%3A\\_A\\_Chemical\\_Process\\_Dynamics\\_and\\_Controls\\_\(Woolf\)/13%3A\\_Statistics\\_and\\_Probability\\_Background/13.05%3A\\_Bayesian\\_network\\_theory](https://eng.libretexts.org/Bookshelves/Industrial_and_Systems_Engineering/Book%3A_A_Chemical_Process_Dynamics_and_Controls_(Woolf)/13%3A_Statistics_and_Probability_Background/13.05%3A_Bayesian_network_theory).
  - 17) « 2008\_GHOSTINE\_R.pdf ». s. d. Consulté le 23 novembre 2020.  
[http://docnum.univ-lorraine.fr/public/INPL/2008\\_GHOSTINE\\_R.pdf](http://docnum.univ-lorraine.fr/public/INPL/2008_GHOSTINE_R.pdf).
  - 18) « ActualisationBayes.pdf ». s. d.
  - 19) « AgenaRisk\_User\_Manual.pdf ». s. d.
  - 20) « Bobbio, A., Portinalea L., Minichinob M., Ciancamerla E., 2001. Improving the analysis of dependable systems by mapping fault trees into Bayesian networks. Reliability Engineering & System Safety 71.pdf ». s. d. Consulté le 23 novembre 2020. <http://people.unipmn.it/bobbio/BIBLIO/PAPERS/ANNO01/elsevier-full-text.pdf>.
  - 21) Mechri, Walid, Christophe Simon, et David Morel. 2017. « Retour d'expérience et modèle graphique probabiliste pour l'isolation de défaillances ». In 12eme congrès international pluridisciplinaire en Qualité, Sureté de Fonctionnement et Développement Durable, QUALITA'2017. Bourges, France. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01628913>.
  - 22) Mouss, Dr Djamel. s. d. « Etude de cas : Entreprise COTITEX - BATNA », 124.
  - 23) Vogel, Kristin. s. d. « Applications of Bayesian networks in natural hazard assessments », 97.
  - 24) [Oreda]\_OREDA\_-\_Offshore\_Reliability\_Data\_Handbook(BookFi.org).pdf
  - 25) Sam Mannan\_ Frank P Lees - Lees' loss prevention in the process industries \_ hazard identification, assessment, and control (2005, Elsevier Butterworth-Heinemann) - libgen.lc.pdf
  - 26) Thèse\_de\_Doctorat\_LMD-Analyse\_quantitative\_des\_risque (1).pdf
  - 27) Improving the analysis of dependable systems by mapping fault trees into Bayesian networks A. Bobbioa , L. Portinalea , M. Minichinob , E. Ciancamerlab,

- 28) Thèse\_de\_Doctorat Intégration de la Sûreté de Fonctionnement dans les Processus d'Ingénierie Système
- 29) Retour d'expérience et modèle graphique probabiliste pour l'isolation de défaillances  
Walid Mechri, Christophe Simon, David Morel
- 30) Turk - Quantitative Operational Risk Management.pdf
- 31) Vogel - Applications of Bayesian networks in natural hazard.pdf
- 32) Aquaro et al. - 2012 - A Bayesian Networks Approach to Operational Risk.pdf
- 33) Kelly et Smith - 2011 - Bayesian Inference for Probabilistic Risk Assessment.pdf
- 34) Analyse de risques : Identification et estimation : Démarches d'analyse de risques -  
Méthodes qualitatives d'analyse de risques - Les concepts fondamentaux liés au risque
- 35) Méthodes de Monte Carlo pour l'inférence statistique Pierre Gloaguen Cours ENSTA,  
Avril 2020