



**Ministère de l'Enseignement Supérieur  
et de la Recherche Scientifique**

**Université de Batna 2-Mostefa Ben Boulaid**

**Institut d'Hygiène & Sécurité**

**Laboratoire de Recherche en Prévention Industrielle**



# **THÈSE**

**Présentée pour obtenir le grade**

**DE DOCTEUR EN SCIENCES**

**En Hygiène & Sécurité Industrielle**

**Option : Gestion des Risques**

**Par**

**Mr BOURARECHE Mouloud**

**Magister en Hygiène et Sécurité Industrielle**

---

## **Évaluation des Performances des Barrières de Sécurité dans un Environnement de Connaissances Imparfaites**

---

Soutenue le 11/02/2021 devant le Jury composé de:

Mr. Djebabra Mébarek, Professeur à l'Université de Batna 2,	Président
Mr. Nait-Said Rachid, Professeur à l'Université de Batna 2,	Rapporteur
Mme. Zidani Fatiha, Professeure à l'Université de Batna 2,	Co-Rapporteur
Mr. Innal Fares, Professeur à l'Université de Skikda,	Examineur
Mr. Korichi Mourad, Professeur à l'Université de Ouargla,	Examineur
Mr. Negrou Belkhir, Maître de Conférences «A» à l'Université de Ouargla,	Examineur
Mme Ouazraoui Nouara, Maître de Conférences «A» à l'Université de Batna 2,	Membre Invité

## **DÉDICACE**

*Je voudrais tout d'abord remercier infiniment Dieu;*

*Je dédie mes travaux de thèse*

*À mes chers parents qui ont donné de leur mieux;*

*À ma femme et à ma petite Hanine-Loubna avec mes meilleurs vœux;*

*À mes sœurs et frères Kabina, Soria, Zina, Abdenour, Zahir et Abdelhalim;*

*À ma grand-mère et mes tentes, à mon oncle El Khier et sa famille;*

*À la mémoire de mon grand père Bourareche Slimane;*

*À tous les membres de la famille Ghanem. A, père, sœurs et frères;*

*À la mémoire de ma belle mère Doumi. A.*

## REMERCIEMENT

*Le travail de recherche exposé dans cette thèse a été réalisé au sein du de l'Institut Universitaire d'Hygiène et Sécurité Industrielle-Université de Batna 2, dans le cadre des activités de recherche menées par le Laboratoire de Recherche en Prévention Industrielle (LRPI).*

*Je tiens à exprimer mes sincères remerciements à mon encadreur, professeur Nait-Saïd Rachid pour la confiance, le soutien et l'encouragement permanents tout au long de réalisation de ce travail. Son aide et ses précieux conseils ont contribué fortement à la bonne réalisation de ce travail.*

*Je suis aussi très reconnaissant envers Madame Zidani Fatiba, Professeur à l'Université de Batna pour son aide et ses encouragements et l'intérêt qu'elle a accordé à ce travail.*

*Je tiens à remercier Monsieur Djebabra Mebarek, Professeur et Directeur de Laboratoire LRPI d'Institut d'Hygiène et Sécurité industrielle de l'Université de Batna 2 de me faire l'honneur d'être président du jury d'examen de cette thèse.*

*Mes sincères remerciements vont aussi au jury d'examen, Monsieur Innal Fares, Professeur à l'université de Skikda auquel je suis très reconnaissant, Monsieur Korichi Mourad, Professeur à l'Université de Ouargla, Monsieur Negrou Belkhir, Maître de Conférences «A» à l'université de Ouargla; Mme Ouazraoui Nouara, Maître de Conférences «A» à l'Université de Batna2, pour avoir bien voulu me faire l'honneur de juger ce travail et de participer à ce jury.*

*Mes remerciements s'adressent aussi à Messieurs Sal Rachid, Chiremsel Zakariya, Maîtres de conférences à l'université de Batna 2 pour leur aide et soutien.*

*Je remercie également tous mes collègues et personnels de l'institut d'Hygiène et Sécurité Industrielle de l'université de Batna 2.*

*Je remercie infiniment ma femme pour son aide, sa compréhension et ses encouragements permanents.*

*Je remercie enfin tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail de thèse.*

*Merci à toutes et à tous.*

**M. BOURARECHE**

## Résumé

BORA (Barrier and Operational Risk Analysis) est une approche récente développée pour répondre au problème d'analyse des risques et d'évaluation des performances des barrières de sécurité. Il ressort de ses applications que deux problèmes majeurs doivent être posés et solutionnés et notre problématique s'y attache. Il s'agit principalement de: 1) l'absence des aspects du type «Optimisation des stratégies de maintenance» en vue d'améliorer les performances des barrières de sécurité. 2) l'application de la moyenne pondérée comme modèle d'agrégation des RIFs sans aucune référence aux critères d'applicabilité de ce modèle. L'objectif principal de cette thèse est de contribuer à la résolution de ces problèmes qui sont liés essentiellement à un problème d'incertitudes liées d'une part, aux données d'entrée fournies par les experts (incertitudes épistémiques) et d'autre part, à la moyenne pondérée comme modèle d'agrégation des RIFs dans la méthode BORA conventionnelle (incertitudes de modélisation). La première solution consiste à proposer une extension de la méthode BORA, dite "BORA-CIA" qui servira comme support d'aide à l'optimisation de la stratégie de maintenance et d'inspection des barrières de sécurité. La seconde solution consiste à mener une étude comparative entre le modèle de la moyenne pondérée et les modèles d'agrégation multicritères proposés, en l'occurrence le maximum pondéré, le minimum pondéré et la moyenne pondérée ordonnée. Les résultats ont montré que la moyenne pondérée est inadéquate dans certaines situations et que les opérateurs d'agrégation proposés peuvent être appropriés dans les situations les plus défavorables. Afin de mettre en valeur et valider ces propositions, elles sont appliquées à un séparateur de gaz.

**Mots-clés:** Analyse des risques, performances des barrières de sécurité, méthode BORA, analyse d'importance de criticité, jugement d'experts et agrégation multicritère, incertitudes épistémiques de modélisation.

## Abstract

BORA (Barrier and Operational Risk Analysis) is a new approach recently developed to resolve the problem of risk analysis and performance assessment of safety barriers. It emerges from its applications that two major problems need to be posed and solved, to which our problem is attached. These are mainly: 1) the absence of maintenance strategy optimization aspects to improve the safety barriers' performance. 2) the application of the weighted average as an aggregation model for FIRs without any reference to the applicability criteria of this model. The main objective of this thesis is to contribute to the resolution of these problems which are essentially related to a problem of uncertainties in expert input data ("epistemic uncertainties") and, to the weighted average as an aggregation model for RIFs in conventional BORA method ("modeling uncertainties"). The first solution is to propose a BORA extension, so-called "BORA-CIA", as a support in helping the optimization of the maintenance and inspection strategy of the safety barriers. The second solution consists in conducting a comparative study between the weighted average model and the multicriteria aggregation models used in this case which are, the weighted maximum, the weighted minimum and the weighted ordered average. The results of this study revealed that weighted average is inappropriate in some situations and the proposed aggregation operators seems more appropriate in the unfavorable situations. In order to enhance and validate these proposals, they are applied to a gas separator.

**Key-words:** Risk analysis, performance of safety barriers, BORA method, criticality importance analysis, expert judgment and multicriteria aggregation, epistemic and modeling uncertainties.

## ملخص

المتقاربة "BORA" (تحليل الحواجز و المخاطر العملية) هي طريقة تم تطويرها مؤخرا لمعالجة مسألة تحليل المخاطر وتقييم أداء الحواجز الأمنية. في هذا الإطار و من خلال تطبيقاتها يتضح أنه يجب طرح مشكلتين رئيسيتين وحلها، واللذان تركز عليهما إشكاليتنا. أولاً: غياب جوانب من نوع «تحسين استراتيجيات الصيانة» من أجل تحسين أداء الحواجز الأمنية. ثانياً: تطبيق المتوسط المرجح كنموذج لتجميع العوامل المؤثرة على المخاطر "RIFs" دون أي إشارة إلى معايير قابلية التطبيق لهذا النموذج. الهدف الرئيسي لهذه الأطروحة هو المساهمة في حل هذه المشاكل التي ترتبط أساساً بها مشكلة عدم اليقين و الإرتيابات من ناحية بيانات الخبراء (الإرتيابات وعدم اليقين الناجمة عن نقص المعرفة) ومن ناحية أخرى، إلى المتوسط المرجح كنموذج لتجميع العوامل المؤثرة على المخاطر "RIFs" في المتقاربة "BORA" (حالات الإرتيابات وعدم اليقين الناجمة عن النماذج المستخدمة). الحل الأول هو اقتراح امتداد لهذه الطريقة و المسماة "BORA-CIA" والتي ستكون بمثابة دعم لتحسين إستراتيجية صيانة وتفتيش الحواجز الأمنية. يتمثل الحل الثاني في إجراء دراسة مقارنة بين النموذج المتوسط المرجح ونماذج التجميع متعددة المعايير، أي الحد الأقصى المرجح والحد الأدنى المرجح والمتوسط المرجح الترتيبي (OWA). أظهرت النتائج أن المتوسط المرجح غير ملائم في حالات معينة وأن عوامل تشغيل التجميع المقترحة قد تكون ملائمة في الحالات الأكثر منافية. من أجل إبراز أهمية هذه المقترحات والتحقق منها، تم تطبيقها على فاصل الغاز.

**كلمات دلالية:** تحليل المخاطر، فعالية حواجز السلامة، المتقاربة "BORA"، تحليل الأهمية، أحكام الخبراء و التجميع المتعدد المعايير، الإرتيابات وعدم اليقين.

# TABLE DES MATIÈRES

<b>DÉDICACE</b> .....	i
<b>REMERCIEMENTS</b> .....	ii
<b>RÉSUMÉ</b> .....	iii
<b>LISTE DES FIGURES</b> .....	ix
<b>LISTE DES TABLEAUX</b> .....	xi
<b>LISTE DES ABRÉVIATIONS</b> .....	xii
<b>INTRODUCTION GÉNÉRALE</b> .....	<b>1</b>
1 Problématique de recherche .....	1
2 Objectif .....	3
3 Organisation de thèse.....	3
<b>CHAPITRE I</b>	
<b>ANALYSE DES RISQUES ET PERFORMANCE DES BARRIÈRES DE SÉCURITÉ DANS UN ENVIRONNEMENT INCERTAIN</b> .....	<b>5</b>
<b>I.1. Introduction</b> .....	<b>5</b>
<b>I.2. Concepts et définitions</b> .....	<b>6</b>
I.2.1. Notion de danger.....	6
I.2.2. Notion du risque.....	6
I.2.3 Facteur d'influence de risque.....	7
I.2.4 Notion de criticité / Grille de criticité.....	7
<b>I.3 Concept de défense en profondeur</b> .....	<b>8</b>
<b>I.4 Concept de barrière de sécurité</b> .....	<b>9</b>
<b>I.5 Typologie des barrières de sécurité</b> .....	<b>9</b>
I.5.1 Typologie des barrières de sécurité selon leur nature .....	9
I.5.1.1 Barrière technique de sécurité (BTS) .....	9
I.5.1.2 Barrières humaines de Sécurité (BHS).....	10
I.5.1.3 Systèmes à Action Manuelle de Sécurité (SAMS) .....	10
I.5.2 Typologie des barrières de sécurité selon leur mode de fonctionnement.....	10
<b>I.6 Performance des barrières de sécurité</b> .....	<b>11</b>
<b>I.7 Évaluation de performance d'une barrière de sécurité</b> .....	<b>12</b>
I.7.1 Critère d'indépendance .....	12
I.7.2 Critère de l'efficacité .....	12
I.7.3 Critère du temps de réponse .....	12
I.7.3 Critère de niveau de confiance .....	12
<b>I.8 Démarche de gestion des risques</b> .....	<b>13</b>
I.8.1 Analyse du risque.....	13

I.8.2 Estimation du risque.....	14
I.8.3 Évaluation du risque.....	14
I.8.4 Acceptation du risque .....	14
I.8.5 Réduction du risque.....	14
<b>I.9 Méthodes d'analyse et d'évaluation des risques.....</b>	<b>15</b>
I.9.1 Méthodes qualitatives.....	15
I.9.1.1 Analyse préliminaire des risques (APR).....	16
I.9.1.2 Hazard and Operability Study (HAZOP).....	16
I.9.2 Méthodes semi-quantitatives.....	17
I.9.2.1 Analyse des couches de protection (LOPA) .....	17
I.9.2.2 Graphe de risque étalonné.....	19
I.9.3. Méthodes quantitatives.....	20
I.9.3.1. Arbre des événements (AdE).....	20
I.9.3.2. Arbre de défaillances (AdD).....	20
I.9.3.3. Méthode de Nœud Papillon .....	21
<b>I.10 Aperçu sur les incertitudes: concepts de base .....</b>	<b>22</b>
I.10.1 Concept d'incertitude .....	22
I.10.2 Types d'incertitudes.....	22
I.10.3 Incertitude dans le domaine d'analyse des risques.....	23
IV.10.3.1 Incertitudes paramétriques.....	23
I.10.3.2 Incertitudes liées aux modèles.....	24
I.10.3.3 Incertitudes de complétude (Incomplétude) .....	24
<b>I.11 Méthodologie d'analyse des risques retenue .....</b>	<b>25</b>
I.11.1 Principe de la méthode BORA .....	25
I.11.2 Déroulement de la méthode BORA.....	25
I.11.3 Avantages et limites de la méthode BORA .....	26
<b>I.12. Problèmes soulevés dans le cadre de BORA .....</b>	<b>27</b>
I.12.1 Problème d'analyse d'importance de criticité.....	27
I.12.2 Problème des imperfections et incertitudes .....	28
I.12.3 Problème liés au jugement d'experts.....	29
I.12.3.1 Incertitude liée à la détermination des intervalles des valeurs moyennes.....	29
I.12.3.2 Incertitudes liées à la quantification des facteurs d'influence (RIFs) .....	29
I.12.4 Problème liés à l'agrégation multicritère des RIFs.....	31
<b>I.13 Conclusion.....</b>	<b>31</b>
<b>CHAPITRE II:</b>	
<b>PRÉSENTATION DE L'APPROCHE BORA-CIA.....</b>	<b>32</b>
<b>II.1 Introduction.....</b>	<b>32</b>
<b>II.2 Contexte et objectifs de la démarche proposée .....</b>	<b>33</b>
<b>II.3 Description de la démarche proposée .....</b>	<b>33</b>

<b>II.4 Partie 1: BORA conventionnelle</b> .....	34
II.4.1 Identification des scénarios d'accident .....	35
II.4.1.1 <i>Élaboration des diagrammes blocs barrières</i> .....	35
II.4.1.2 <i>Développement des arbres de défaillances des fonctions de sécurité</i> .....	35
II.4.2 Attribution des fréquences et des probabilités moyennes.....	36
II.4.3 Calcul des fréquences moyennes des scénarios accidents .....	36
II.4.4 Identification des facteurs d'influence des risques (RIFs) .....	36
II.4.5 Attribution des poids et des scores aux RIFs .....	38
II.4.5.1 <i>Attribution des scores (Qi) aux facteurs d'influence</i> .....	38
II.4.5.2 <i>Calcul du facteur modifiant MF</i> .....	38
II.4.6 Détermination des fréquences et des probabilités révisées.....	40
II.4.7 Détermination des fréquences révisées des scénarios d'accident .....	40
II.4.8 Évaluation des scénarios d'accidents avant et après la révision.....	41
<b>II.5 Partie 2: Analyse d'importance de criticité (Criticality Importance Analysis-CIA)</b> ..41	
II.5.1 Détermination du facteur d'importance critique des EdBs.....	42
II.5.2 Analyse comparative via la variation des facteurs d'importance critiques .....	44
II.5.3 Classement des événements de base en fonction de leurs CIFrév.....	44
II.5.4 Évaluation de l'impact des RIF.....	45
II.5.4.1 <i>Analyse de l'impact des RIF sur la criticité des EdBs</i> .....	45
II.5.4.2 <i>Impact des RIFs sur la performance des barrières de sécurité</i> .....	46
II.5.4.3 <i>Impact des RIF sur la fréquence des scénarios d'accidents</i> .....	46
II.5.5 Analyse et amélioration de la performance des barrières de sécurité .....	46
<b>II.6 Conclusion</b> .....	47
<b>CHAPITRE III:</b>	
<b>ÉTUDE DE CAS ET VALIDATION DE L'APPROCHE PROPOSÉE (BORA-CIA)</b> .....	48
<b>III.1 Introduction</b> .....	48
<b>III.2 Description du processus et identification des risques</b> .....	49
III.2.1 Analyse structurelle et fonctionnelle du séparateur .....	49
III.2.2 Identification des accidents majeurs au niveau séparateur .....	51
<b>III.3 Partie 1 : Application de BORA conventionnelle</b> .....	52
III.3.1 Élaboration des scénarios d'accidents .....	52
III.3.1.1 <i>Premier scénario d'accident : Incendie</i> .....	52
III.3.1.2 <i>Second scénario d'accident: Explosion</i> .....	54
<b>III.4 Attribution des fréquences et des probabilités moyennes</b> .....	55
<b>III.5 Calcul des fréquences moyennes des scénarios accidents</b> .....	55
<b>III.6 Identification des facteurs d'influence des risques (RIFs)</b> .....	56
<b>III.7 Attribution des poids et des scores aux RIFs</b> .....	58
III.7.1 Attribution des poids (Wi) .....	58
III.7.2 Attribution des scores (Qi).....	58

<b>III.8 Résultats de BORA conventionnelle .....</b>	<b>59</b>
III.8.1 Variation des fréquences et probabilités des événements initiateurs et de base.....	59
III.8.2 Variation des indisponibilités des barrières de sécurité .....	63
III.8.3 Variation des fréquences des scénarios d'accident.....	64
<b>III.9 Discussion sur l'applicabilité de la BORA dans notre cas .....</b>	<b>65</b>
<b>III.10 Intégration de l'analyse d'importance (CIA) dans BORA .....</b>	<b>65</b>
III.10.1. Objectifs.....	65
III.10.2. Détermination des facteurs d'importance «CIFmoy et CIFrév», étude comparative.....	66
<b>III.11 Classement des composants avant et après révision.....</b>	<b>67</b>
<b>III.12 Évaluation de l'impact des RIFs sur les CIFs des événements de base .....</b>	<b>69</b>
<b>III.13 Évaluation de l'impact des RIFs sur les performances des barrières de sécurité .....</b>	<b>70</b>
<b>III.14 Évaluation de l'impact des RIFs sur les fréquences des scénarios d'accident.....</b>	<b>70</b>
<b>III.15 Évaluation des scénarios d'accidents.....</b>	<b>71</b>
<b>III.16 Conclusion.....</b>	<b>72</b>
<b>CHAPITRE IV:</b>	
<b>PROBLÈME D'AGRÉGATION DES FACTEURS D'INFLUENCE DES RISQUES DANS LA MÉTHODE BORA .....</b>	<b>73</b>
<b>IV.1 Introduction .....</b>	<b>73</b>
<b>IV.2 Jugement d'experts et agrégation multicritère.....</b>	<b>74</b>
IV.2.1 Jugement d'experts.....	74
IV.2.2 Agrégation multicritère .....	75
IV.2.2.1 Généralités.....	75
IV.2.2.2 Opérateurs d'agrégation .....	75
<b>IV.3 Jugements d'experts et agrégation multicritères dans la méthode BORA.....</b>	<b>81</b>
IV.3.1 Problématique d'agrégation multicritères dans la méthode BORA.....	81
IV.3.2 Critères de choix des opérateurs d'agrégation dans la méthode BORA.....	81
<b>IV.4 PLAN DE COMPARAISON DES OPÉRATEURS D'AGRÉGATION DANS BORA.....</b>	<b>82</b>
IV.4.1 Première Etape : Détermination des fréquences des événements initiateurs et des probabilités des événements de base par les différents modèles d'agrégation	82
IV.4.1.1 Agrégation par le Minimum pondéré.....	82
IV.4.1.2 Agrégation par le Maximum pondéré.....	83
IV.4.1.3 Agrégation par moyenne pondérée ordonnée (OWA) .....	83
IV.4.2 Deuxième Etape : Détermination des probabilités de défaillance des barrières de sécurité par les différents modèles d'agrégation des facteurs de risque .....	83
IV.4.3 Troisième Etape : Détermination des fréquences des accidents par les différents modèles d'agrégation des facteurs de risque.....	84

---

<b>IV.5 ÉTUDE DE CAS : APPLICATION AU SYSTÈME « SÉPARATEUR DE GAZ »</b> .....	84
IV.5.1 Variation des fréquences et probabilités des événements en fonction du modèle d'agrégation .....	84
IV.5.2 Variation des PFD des barrières de sécurité en fonction du modèle d'agrégation .....	87
IV.5.3 Variation des fréquences des scénarios d'accidents en fonction du modèle d'agrégation .....	89
IV.5.4 Exploration de l'usage des modèles d'agrégation dans le cadre de BORA.....	89
<b>IV.6 Conclusion</b> .....	91
<b>CONCLUSION GÉNÉRALE</b> .....	92
<b>RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES</b> .....	95
<b>ANNEXES</b> .....	104
Annexe A: Liste générique des facteurs d'influence de risques (RIFs) .....	105
Annexe B: Propriétés des opérateurs d'agrégation .....	107
Annexe C: Travaux réalisés dans le cadre de la thèse .....	108
1 [Bourareche et al. 2015] .....	109
2 [Bourareche et al. 2018a] .....	110
3 [Bourareche et al. 2018b] .....	111
4 [Bourareche et al. 2020] .....	112

## LISTE DES FIGURES

Figure I.1: Relation entre les notions de danger et de risque [Haddad, 2012].....	7
Figure I.2: Grille de criticité en fonction de probabilité et de gravité.....	8
Figure I.3: Concept de défense en profondeur (Modèle de Reason) [Reason et al, 1997] .....	8
Figure I.4: Types des Barrières de sécurité [INERIS DRA-17, 2018] .....	9
Figure I.5: Schéma illustratif des fonctions de sécurité [INERIS, 2004] .....	11
Figure I.6: Sélection par critères minimaux d'une barrière de sécurité [OMEGA, 20].....	12
Figure I.7: Processus de gestion des risques [ISO/IEC 27005, 2011].....	13
Figure I.8: Principe de réduction du risque.....	15
Figure I.9: Approches d'investigation: Inductive et Déductive [Mazouni, 2009].....	15
Figure I.10 Scénario d'accident selon le modèle APR.....	16
Figure I.11: Couches de réduction de risques [CCPS, 2001].....	18
Figure I.12: Exemple d'un AdE avec des couches de protection indépendantes .....	18
Figure I.13: Graphe de risque avec une description qualitative .....	19
Figure I.14: Schéma d'un AdE avec des barrières de sécurité. ....	20
Figure I.15: Schéma illustratif du modèle nœud papillon [INERIS-DRA-76, 2015]. ....	21
Figure I.16: Catégories d'incertitudes de type épistémique.....	23
Figure I.17: Procédure de BORA conventionnelle [Haugen et al., 2010].....	26
Figure I.18: Illustration du principe de propagation des incertitudes dans BORA. ....	28
Figure II.1: Démarche globale de BORA-CIA [Bourareche et al., 2020] .....	34
Figure II.2: Diagramme bloc barrières .....	35
Figure II.3: Modèles de base utilisés par la méthode BORA [Bourareche et al., 2020] .....	36
Figure II.4: Exemple de diagramme de fluence de risque. ....	37
Figure II.5: Aspects de facteurs d'influence du risque [Haugen et al., 2010].....	37
Figure II.6: Niveaux d'influence des RIFs.....	45
Figure II.7: Échelle de dépendance entre MF et $\Delta$ CIF.....	46
Figure III.1: Séparateur de pétrole/gaz (G01-VN-45-01).....	49
Figure III.2: Diagramme bloc barrières. Cas du premier scénario (incendie).....	53
Figure III.3: Arbres de défaillances des fonctions de sécurité. Cas du premier scénario (Incendie).....	53
Figure III.4: Diagramme bloc barrières. Cas du second scénario (Explosion) .....	54
Figure III.5: Arbres de défaillances des fonctions de sécurité. Cas du second scénario (Explosion).....	55
Figure III.6: Variation des fréquences et probabilités des événements initiateurs et de base avant et après révision. Cas du premier scénario .....	62
Figure III.7: Variation des fréquences et probabilités de des événements initiateurs et de base avant et après révision. Cas du second scénario .....	63

Figure III.8:Variation des probabilités de défaillance des fonctions de sécurité avant et après révision. Cas du premier scénario .....	63
Figure III.9: Probabilités de défaillance des fonctions de sécurité avant et après révision Cas du second scénario .....	64
Figure III.10: Fréquences des scénarios d'accidents avant et après révision .....	64
Figure III.11: Valeurs des CIFs et $\Delta$ CIFs avant et après révision des événements de base Relatifs aux barrières de sécurité. Cas du premier scénario.....	67
Figure III.12. Valeurs des CIFs et $\Delta$ CIFs avant et après révision des événements de base Relatifs aux barrières de sécurité. Cas du second scénario.....	67
Figure III.13. Matrice de risque [Sonatrach, 2010] .....	71
Figure IV.1.Variation des fréquences et probabilités des événements initiateurs et de base avant et après révision. Cas du premier scénario.....	86
Figure IV.2.Variation des fréquences et probabilités des événements initiateurs et de base avant et après révision. Cas du second scénario.....	86
Figure IV.3.Variation des PFD moyennes et révisées des barrières de sécurité obtenues par différents opérateurs d'agrégation. Cas du premier scénario .....	88
Figure IV.4.Variation des PFD moyennes et révisées des barrières de sécurité obtenues par différents opérateurs d'agrégation. Cas du second scénario .....	88
Figure IV.5.Variation des fréquences moyennes et révisées des scénarios d'accidents obtenues par différents opérateurs d'agrégation. Cas de deux scenarios .....	89

## **LISTE DES TABLEAUX**

Tableau I.1: Exemple de définition qualitative et quantitative des paramètres du risque .....	19
Tableau II.1: Attribution des poids ( $W_i$ ) aux facteurs d'influence .....	38
Tableau II.2: Schéma générique de notation des RIFs [Haugen et al, 2010] .....	39
Tableau II.3: Échelles d'intervalles proposées [Haugen et al, 2010]. .....	40
Tableau II.4: Variation de la criticité en fonction des niveaux de conformité .....	44
Tableau III.1. Décomposition du système «séparateur du gaz» .....	50
Tableau III.2. Scénarios d'accident retenus relatifs au séparateur .....	52
Tableau III.3. RIFs relatifs au premier scénario (Incendie) .....	56
Tableau III.4. RIFs relatifs au second scénario (Explosion) .....	57
Tableau III.5. Échelle proposée pour la cotation des RIFs .....	59
Tableau III.6. Fréquences/ probabilités moyennes, poids, scores et fréquences/probabilités révisées. Cas du premier scénario (Incendie) .....	59
Tableau III.7. Fréquences/ probabilités moyennes, poids, scores et fréquences/ probabilités révisées. Cas du second scénario (Explosion) .....	60
Tableau III.8. Ordre des événements de base selon leurs CIFs avant et après révision Cas du premier scénario .....	68
Tableau III.9. Ordre des événements de base selon leurs CIF avant et après révision. Cas du second scénario .....	68
Tableau III.10. Coefficients de corrélation entre MF et $\Delta$ CIF. Cas du premier scénario .....	69
Tableau III.11. Coefficients de corrélation entre MF et $\Delta$ CIF. Cas d u second scénario .....	70
Tableau IV.1. Fréquences/probabilités moyennes et révisées obtenues par les différents opérateurs d'agrégation. Cas du premier scénario .....	84
Tableau IV.2. Fréquences/probabilités moyennes et révisées obtenues par les différents opérateurs d'agrégation. Cas du second scénario .....	85
Tableau IV.3. PFDs moyennes et révisées obtenues par différents opérateurs d'agrégation. Cas de deux scenarios .....	87
Tableau IV.4. Fréquences moyennes et révisées des scenarios d'accidents obtenues par différents opérateurs d'agrégation. Cas de deux scenarios .....	89

## **LISTE DES ABRÉVIATIONS**

AC	Automate de Conduite
AdD	Arbre de Défaillances
AdE	Arbre des Evénements
ALARP	As low as Reasonably Practicable
AMDEC	Analyse des Modes de Défaillances, de leurs Effets et leur Criticité
APR	Analyse Préliminaire des Risques
AS	Automate de Sécurité
BHS	Barrières Humaines de Sécurité
BLEVE	Boiling Liquid Expanding Vapors Explosion
BORA	Barrier and Operational Risk Analysis
BORA-CIA	Barrier and Operational Risk Analysis - Criticality Importance Analysis"
BPCS	Basic Process Control System
BTS	Barrières Techniques de Sécurité
CCPS	Center for Chemical Process Safety
CEI	Commission Electrotechnique Internationale
CIA	Criticality Importance Analysis
CIF	Criticality Importance Factor
CIFmoy	Facteur d'Importance Critique moyen
CIFrév	Facteur d'Importance Critique révisé
CP	Capteur de Pression
CPU	Central Processing Unit
DBB	Diagramme Bloc Barrière
DCS	Distributed Control System
E/E/EP	Électrique / Electronique / Electronique Programmable
EdB/E	Evénement de Base
ESD	Emergency Shutdown
MF	Modified Factor
NC	Niveau de Confiance
FI	Flow Indicator
<i>Finf, Fsup</i>	Fréquence inférieure, Fréquence supérieure
Fmoy	Fréquence moyenne
HAZID	HAZard IDentification
HAZOP	Hazard and Operability Studies
HMI	Human Machine Interface
IB(e),	Importance Birnbaum(e)
IEC	International Electrotechnical Commission
IE	Initiating Event
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
INERIS	Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques
IPL	Independent Protection layers
ISO	International Standard Organisation
LAH, LAL	Level Alarm High, Level Alarm Low
LC	Level Controller

LIC	Level Indicator Controller
LIS	Level Indicator Sensor
LOPA	Layers of Protection Analysis
LS	Logic Solver
LSHH	Level Switch High High
LSLL	Level Switch Low Low
LTC	Level Temperature Control
LV	Level Valve
MFs	Modified Factors
MP	Moyenne pondérée
OH	Opérateur Humain
OHSAS	Occupational Health and Safety Assessment Series
OREDA	Offshore Reliability Data
OWA	Ordered Weighted Averaging
PA	Pressure Alarm
PAH	Pressure Alarm High
PAL	Pressure Alarm Low
PCV	Pressure Controller Valve
PFD	Probability Of Failure On Demand
PFH	Probability of Failure on Hour
PHA	Process Hazard Analysis
PIA	Pressure Indicator Alarm
PID	Piping And Instrumentation Diagram
Pinf, Psup	Probabilité inférieure, Probabilité supérieure
PLC	Programmable Logic Controller
Pmoy, Prév	Probabilité moyenne, Probabilité révisée
PSHH	Pressure Switch High High
PSLL	Pressure Switch Low Low
PSV, PV	Pressure Safety Valve, Pressure Valve
Qi	Scores
RIFs	Risk Influencing Factors
SAMS	Systèmes à Action Manuelle de Sécurité
SDV	Shut Down Valve
SF	Safety Function «fonction de sécurité»
SIF	Safety instrumented Function
SIL	Safety Integrity Level
SIS	Safety Instrumented System
SONATRACH	Société Nationale pour la Recherche, la Production, le Transport, la Transformation et la Commercialisation des Hydrocarbures
St	Statut
TI	Temperature Indicator
TOR	Tout Ou Rien
UTGA	Unité de Traitement de Gaz
VB	Vanne By-pass
Wi	Weight

# **INTRODUCTION GÉNÉRALE**

## **1 Problématique de recherche**

Le retour d'expérience sur des accidents industriels a montré qu'au cours de leur occurrence, les barrières de sécurité concernées n'étaient pas disponibles pour maîtriser convenablement les situations dangereuses générées [Kang et al., 2016]. De ce fait, leur maîtrise est devenue une préoccupation majeure des managers des risques et des industriels qui sont sensées déployer des efforts en matière de gestion des risques en mettant en œuvre des stratégies de maîtrise des risques et de contrôle des performances des barrières de sécurité afin de réduire la fréquence et/ou la gravité des accidents [Chettouh et al., 2018]. À cet effet, et en vue de répondre à ce besoin, de nombreuses méthodes qualitatives, semi-quantitatives et quantitatives d'analyse des risques et d'évaluation des performances des barrières de sécurité sont développées et offertes pour garantir que les installations industrielles soient sécurisées et répondant aux normes et à la réglementation [ISO 31000, 2009].

Parmi ces méthodes, l'étude des dangers et d'opérabilité (HAZOP) [CEI, 2016b], l'analyse de l'arbre des défaillances (AdD) [CEI, 2016a], l'arbre des événements (AdE), l'analyse de la couche de protection (LOPA) [CCPS, 2001] et la méthode des barrières et l'analyse opérationnelle des risques (En anglais, Barrier and Operational Risk Analysis : BORA), objet d'étude de la présente thèse. La méthode BORA est une approche relativement récente dédiée à l'analyse des risques et à l'évaluation des performances des barrières de sécurité [Sklet et Haugen, 2004; Aven et al, 2006a; Haugen et al, 2010]. Elle combine plusieurs aspects d'analyse et d'évaluation qualitatif et quantitatif et de jugement d'experts, impliquant l'analyse par arbres de défaillance (AdD), par arbres d'événements (AdE) et par diagrammes d'influence des risques. Plus spécifiquement, moyennant ces outils, la méthode BORA examine les barrières de sécurité au regard des facteurs techniques, humains et organisationnels qui influencent leurs performances. En effet, il constitue un outil puissant pour l'analyse des facteurs d'influence des risques (RIFs) qui pourraient avoir un impact sur les défaillances des barrières de sécurité et l'occurrence des scénarios accidents.

Dans le cadre de cette approche, une "BORA-Release" est développée et appliquée avec succès pour analyser qualitativement et quantitativement les risques liés aux rejets d'hydrocarbures [Sklet et al, 2006]. Des études de cas ont été consacrées aux rejets d'hydrocarbures sur les plateformes de production pétrolière et gazière offshore [Sklet, 2006b ; Aven et al, 2006b]. En outre, sur la base de cette méthode, [Aven et al, 2006b],

Brissaud et al [Brissaud et al., 2009] ont développé un nouveau modèle d'évaluation du taux de défaillance avec facteurs d'influence, qui est dédié en particulier aux systèmes instrumentés de sécurité. Une autre approche, ressemblant légèrement à la méthode BORA, a été proposée par Rahimi et al [Rahimi et al., 2013] et Rausand et al [Rausand, 2011] pour la prévision des taux de défaillance des nouveaux systèmes sous-marins. Toujours dans le cadre des applications, une mise en œuvre de la méthode BORA a été réalisée dans les procédés de production de pétrole et de gaz en Algérie [Bourareche et al, 2015].

Cependant, il ressort des applications de la méthode BORA précitées que deux problèmes majeurs doivent être posés et solutionnés et notre problématique s'y attache. Il s'agit principalement de:

- L'analyse d'importance de criticité qui se révèle surtout dans la phase opérationnelle. En effet, tout impact ou changement voire dégradation de la performance opérationnelle des barrières de sécurité, résultant d'une modification de leur environnement et de leurs conditions d'utilisation, aura inévitablement un impact sur la performance de l'ensemble du système [Prashanth et al, 2017; Sultana et al, 2019; Smith, 2011]. Par conséquent, les actions d'inspection et de maintenance sont entreprises en fonction de l'analyse de l'importance des composants des barrières de sécurité. Il convient de noter que les conséquences des défaillances critiques pourraient inclure le coût de remplacement des composants défectueux, les dommages causés aux équipements ou à l'environnement, et éventuellement les pertes humaines [Rausand et al, 2004; Stapelberg et al, 2009]. Dans cette optique, l'analyse de l'importance via le facteur d'importance critique (CIF : Critical Importance Factor) s'avère indispensable comme complément de la méthode BORA conventionnelle permettant d'estimer la criticité des éléments constitutifs des barrières de sécurité et de les classer en fonction de leur importance pour prioriser les actions de maintenance.
- Le second problème est lié aux jugements d'experts, notamment à l'agrégation des Facteurs d'Influence des Risques (RIFs : Risk Influencing Factors), qui est pratiquement posé de manière cruciale dans le cadre de BORA. En effet, la méthode de la moyenne pondérée utilisée par BORA pose de sérieux problèmes d'interprétation dans les situations extrêmes, la question alors est relative au choix des opérateurs d'agrégation qui dépend entièrement de l'application, des données existantes, de leur nature, (qualitative ou quantitative) et de leur caractère (conjonctif, disjonctif) et ce, pour pouvoir choisir une méthode d'agrégation adéquate [Grabisch et al., 2009]. En effet, la recherche d'une alternative d'agrégation parmi les alternatives possibles doit faire sortir l'état réel ou presque réel des facteurs de risque influençant l'occurrence en terme de probabilités ou de fréquences des événements.

Ces deux problèmes sont étroitement liés à un problème d'incertitudes principalement épistémiques (Connaissances imparfaites) affectant d'une part, la qualité des données issues d'une expertise, i.e. les intervalles de probabilités subjectives et les scores et poids des facteurs de risque et, d'autre part, les modèles d'agrégation de ces facteurs. Autrement dit, la propagation de ces deux types d'incertitudes aurait un impact direct sur les valeurs de la performance probabiliste des barrières de sécurité exprimée sous forme de probabilité de défaillance à la demande (PFD : Probabilité of Failure on Demand) et par conséquent, sur les fréquences des accidents.

## 2 Objectifs de la thèse

Par rapport à la problématique posée, deux principaux objectifs sont attendus à travers cette thèse, à savoir:

- ✓ *Le premier objectif est de proposer une extension de la méthode BORA conventionnelle dite BORA-CIA (BORA-Criticality Importance Analysis) telle qu'elle est développée dans le deuxième chapitre. En effet, cette approche est développée du fait de l'impact des conditions opérationnelles et environnementales connues sous le nom RIFs sur la criticité des composants des barrières de sécurité, sur la performance de ces barrières, sur la fréquence des accidents et donc sur les niveaux de risque. L'idée consiste à incorporer l'analyse de l'importance (CIA) dans la méthode BORA.*
- ✓ *Le second objectif, qui nous paraît aussi important et qui sera développé en quatrième chapitre, est l'étude de choix des opérateurs d'agrégation relativement aux différentes situations rencontrées dans l'industrie. Pour ce, outre la somme pondérée utilisée par BORA, des opérateurs relatifs à la fusion des données et ayant trait aux opérations ensemblistes, à savoir la conjonction et la disjonction, feront l'objet de cette étude. La prise en compte de l'incertitude des valeurs des probabilités subjectives et des RIFs est assurée par des représentations numériques en singletons flous.*

## 3 Organisation de thèse

La thèse présentée est organisée en quatre chapitres:

- ✓ *Dans le premier chapitre, intitulé «**Analyse des risques et performance des barrières de sécurité dans un environnement incertain**», nous exposerons le contexte général de notre thèse, la problématique de recherche, sa formalisation et le positionnement de notre travail parmi les travaux scientifiques afférents. Nous adresserons un état de l'art relatif aux concepts et définitions liés à l'analyse des risques et à l'évaluation des performances des barrières de sécurité. Nous abordons ensuite quelques méthodes qualitatives, semi-quantitatives et quantitatives d'analyse et d'évaluation des risques. Puis nous discuterons les types d'incertitudes inhérentes aux méthodes de gestion des risques. Ensuite nous*

examinons en détail la méthode BORA conventionnelle, ses avantages et ses limites. Enfin nous soulèverons certains problèmes inhérents à cette méthode à savoir l'absence d'une stratégie opérationnelle de maintenance des éléments des barrières de sécurité, et les problèmes liés au jugement d'experts et à l'agrégation multicritère.

- ✓ Dans le second chapitre, intitulé «**Présentation de l'approche BORA-CIA : Barrier and Operational Risk Analysis-Criticality Importance Analysis**», nous présenterons la méthode BORA modifiée que nous avons proposée, sous le nom de «BORA-CIA», ayant pour objet l'amélioration de la méthode BORA conventionnelle. Nous examinerons en détail ses différentes étapes en mettant en exergue l'intérêt de l'intégration de l'analyse d'importance de criticité par rapport à l'analyse de performance des barrières de sécurité et par suite, sur la fréquence des accidents et sur les niveaux du risque.
- ✓ Le troisième chapitre, intitulé «**Etude de cas et validation de l'approche Proposée (BORA-CIA)**», présente l'application de l'approche "BORA-CIA" à un procédé industriel opérationnel en vue de sa validation. Nous présenterons d'abord le système industriel qu'est un séparateur de gaz (Compagnie SONATRACH) et l'identification des risques inhérents à ce système. Une collecte et adaptation de données fréquentielles et probabilistes sont entreprises dans un but de se rapprocher du système réel et de son environnement. Ces données d'entrée serviront à la validation de "BORA-CIA".
- ✓ Le quatrième chapitre, intitulé «**Problème d'agrégation des facteurs d'influence des risques dans la méthode BORA**» sera consacré au problème d'agrégation des valeurs quantifiant les facteurs d'influence de risque et qui sont issues de jugements d'experts. L'objectif étant d'étudier l'impact de la méthode d'agrégation sur les fréquences des événements initiateurs et sur les probabilités moyennes des défaillances élémentaires et delà, sur la performance des barrières de sécurité. Ce chapitre comporte trois parties: la première consiste à évoquer la problématique d'aide à la décision par l'agrégation multicritère dans le cadre de BORA. Dans la deuxième partie nous présenterons les méthodes d'agrégation usuelles (Moyennes pondérées, MAX-MIN et OWA). Dans la troisième partie, une étude comparative des résultats obtenus par ces différentes méthodes sera présentée.

Enfin, la thèse sera clôturée par une conclusion générale décrivant le travail réalisé et les perspectives envisagées.

## **CHAPITRE I**

# **ANALYSE DES RISQUES ET PERFORMANCE DES BARRIÈRES DE SÉCURITÉ DANS UN ENVIRONNEMENT INCERTAIN**

### **I.1. Introduction**

Actuellement les industries sont confrontées à des accidents industriels majeurs qui menacent leur pérennité et remettent en cause leurs objectifs. Face à ce défi, ces industries doivent défendre leur existence en instaurant des stratégies de management et de maîtrise des risques à travers la mise en œuvre des démarches d'analyse de risques et d'évaluation des performances des barrières de sécurité afin de garantir que leurs installations fonctionnent en toute sécurité. Dans sa première étape, la gestion des risques consiste à analyser les risques inhérents aux systèmes industriels en commençant par l'identification des dangers potentiels existants puis l'estimation des risques associés en termes de leur fréquence d'occurrence et de gravité des conséquences. Dans sa deuxième étape, elle consiste à évaluer ces risques par rapport à des critères d'acceptabilité prédéfinis au préalable. Enfin, si le risque est jugé inacceptable, de nouvelles mesures et barrières de sécurité seront mises en œuvre afin de maîtriser ces risques.

Dans ce chapitre, nous allons dans un premier temps présenter quelques concepts et définitions liés à la gestion des risques et décrire le processus de gestion des risques. Puis, nous allons aborder les principales méthodes d'analyse des risques et d'évaluation des performances des barrières de sécurité en décrivant brièvement leurs principes de déroulement. Nous discuterons les types d'incertitudes inhérentes aux méthodes de gestion des risques. Ensuite nous présenterons la méthode BORA (Barrier and Operational Risk Analysis), cadre méthodologique de notre travail, nous discuterons brièvement son principe de déroulement, ses avantages et inconvénients, son aspect d'analyse quantitatif particulier qui est basé le jugement d'experts. Enfin nous soulèverons certains problèmes inhérents à cette méthode à savoir les incertitudes liées à ses étapes, l'absence d'une stratégie opérationnelle de maintenance des éléments des barrières de sécurité, et les problèmes liés au jugement d'experts et à l'agrégation multicritère.

## **I.2. Concepts et définitions**

Une très grande variété des concepts et définitions liés à l'analyse des risques est proposée par plusieurs standards, textes réglementaires et normes, dans cette section il paraît utile de rappeler quelques concepts et notions fondamentaux apparaissant dans les démarches d'analyse des risques.

### **I.2.1. Notion de danger**

La notion de « danger » est définie dans la directive 96/82 /CEI [ISO, 1999] comme une propriété intrinsèque d'une substance dangereuse ou d'une situation physique de pouvoir provoquer des dommages pour la santé humaine et/ou l'environnement.

Selon la norme CEI 61508 [IEC 61508, 2010] et la référence [Desroches, 1995], le danger désigne une nuisance potentielle pouvant porter atteinte aux biens (détérioration ou destruction), à l'environnement, ou aux personnes. Les dangers peuvent avoir une incidence directe sur les personnes, par des blessures physiques ou des troubles de la santé, ou indirecte, au travers de dégâts subis par les biens ou l'environnement.

Le même terme est défini selon le référentiel OHSAS 18001 [OHSAS 18001, 1999] comme une source où une situation pouvant nuire par blessure ou atteinte à la santé, dommage à la propriété et à l'environnement du lieu de travail ou une combinaison de ces éléments.

### **I.2.2. Notion du risque**

Bien qu'il existe de nombreuses définitions pour cerner la notion du risque, les définitions suivantes sont les plus fréquentes:

Selon Villemeur [Villemeur, 1988], le risque est défini comme «une mesure d'un danger associant une mesure de l'occurrence d'un événement indésirable et une mesure de ses effets ou conséquences».

Il est aussi défini selon la norme [ISO, 1999] comme «une combinaison de la probabilité d'occurrence d'un dommage et la gravité de ce dernier ». C'est la probabilité qu'un dommage survienne (fréquence, durée d'exposition au phénomène dangereux, probabilité d'occurrence d'un événement dangereux, possibilités techniques ou humaines d'évitement/limitation du dommage) et la gravité de ce dommage (nature de ce qui est à protéger ; humains, biens, environnement ; gravité des lésions et importance du dommage : une ou plusieurs personnes). Il s'agit de l'éventualité d'une rencontre entre l'homme et un danger.

Cette combinaison est généralement formulée par l'opération de multiplication, suivante:  $Risque (R) = Probabilité (P) \times Gravité (G)$ . Cette relation mathématique est généralement représentée graphiquement par une droite ou une courbe décroissante de Farmer [LIEVENS, 1976] illustrant la partition de l'espace du risque en deux sous-ensembles disjoints, correspondant respectivement au domaine du risque acceptable et à celui du risque inacceptable.

Le risque peut donc être considéré comme une certaine quantification du danger associant une mesure de l'occurrence (probabilité ou fréquence) d'un événement redouté à une estimation de la gravité de ses conséquences. Ainsi, la figure suivante (Figure I.1) permet de bien apprécier l'interaction entre les notions de danger et de risque.

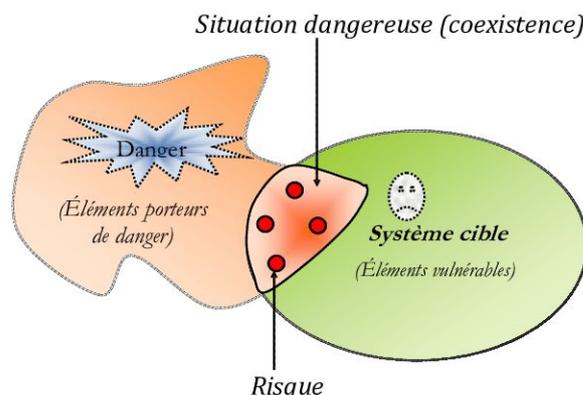


Figure I.1: Relation entre les notions de danger et de risque [Haddad, 2012]

Pour les installations classées, présentant des risques majeurs, la réglementation, via les études de danger, exige l'estimation des probabilités d'occurrence d'aléas et/ou de défaillance des systèmes de sécurité. Ainsi, afin de mieux appréhender les composantes du risque, une intégration des approches et méthodes fonctionnelles et dysfonctionnelles adéquates, susceptibles de modéliser fidèlement les scénarios d'accidents est nécessaire.

### ***1.2.3 Facteur d'influence de risque***

Un facteur de risque est un paramètre que l'on observe et dont on pense qu'il joue un rôle dans la séquence accidentelle sans qu'il puisse être prouvé qu'il en est une cause directe ou indirecte [ISO/CEI Guide 73, 2002]. Ce facteur indique un certain degré de causalité, supérieur à une simple corrélation, qui n'est alors une cause de risque.

Donc, une fois les risques sont sélectionnés à traiter, il devient plus facile d'en déterminer les facteurs: il faut rechercher les faits objectifs présents qui ont une influence positive ou négative sur la probabilité d'occurrence de l'événement indésirable (défaillance...etc.). plus précisément, ces facteurs d'influence de risque dépendent de caractéristiques et spécificités de l'installation étudiée, ils peuvent être de différents types, organisationnel, technique, humain, procédural, administratif, systémique, opérationnel [Haugen et al., 2010].

### ***1.2.4 Notion de criticité / Grille de criticité***

Cette notion est définie comme le résultat d'agrégation de deux dimensions, gravité et probabilité d'occurrence. Elle permet d'estimer l'ampleur d'un risque. L'ensemble des niveaux de risque sont ajustés et classés proportionnellement en fonction de l'importance de deux dimensions (probabilité et gravité) dans une grille appelée grille de criticité. Cette dernière est considérée comme une balance qui nous permet de peser le risque et de décider s'il est acceptable où inacceptable. À l'issue d'un tel résultat qu'on décide de l'opportunité des mesures nécessaires pour maîtriser ce risque. La figure suivante (Figure I.2) montre un exemple d'une grille de criticité en fonction de probabilité et de gravité.

		Échelle de gravité				
		A-Négligeable	B-Significative	C-Majeure	D-Grave	E-Catastrophique
Échelle de fréquence	1-Improbable					
	2-Rare					
	3-Occasionnelle					
	4-Fréquente					
	5-Très Fréquente					

Criticité (C1)	Correspond à un risque acceptable
Criticité (C2)	Correspond à un risque tolérable
Criticité (C3)	Correspond à un risque inacceptable

Figure I.2: Grille de criticité en fonction de probabilité et de gravité

### I.3 Concept de défense en profondeur

Le concept de défense en profondeur est une méthode de raisonnement orientée barrière permettant d'examiner complètement la sécurité d'une installation dangereuse. Ce concept est développé J. Reason [Reason et al, 1997] pour concevoir la sécurité des premiers réacteurs nucléaires [Amory, 2016]. D'après cette méthode, il consiste une suite d'actions, d'équipements ou de procédures, regroupées en niveaux ou barrières de défense dont chacun a pour objet de prévenir les dégradations susceptibles de conduire au niveau suivant et de limiter la conséquence de la défaillance du niveau précédent. En effet, cette méthode s'intéresse à plusieurs niveaux de défense allant de la prévention des situations anormales jusqu'à la limitation de leurs conséquences.

La figure suivante (Figure I.3) illustre les cinq niveaux de défense sur lesquels cette méthode est basée à savoir [INSAG, 2010]:

1. Prévention des anomalies de fonctionnement et des défaillances du système.
2. Maintien de l'installation dans le domaine autorisé de conformité.
3. Maîtrise des accidents à l'intérieur des hypothèses de conception.
4. Prévention de la dégradation des conditions d'accident et limitation des effets.
5. Limitation des conséquences pour les populations en cas d'accidents graves.

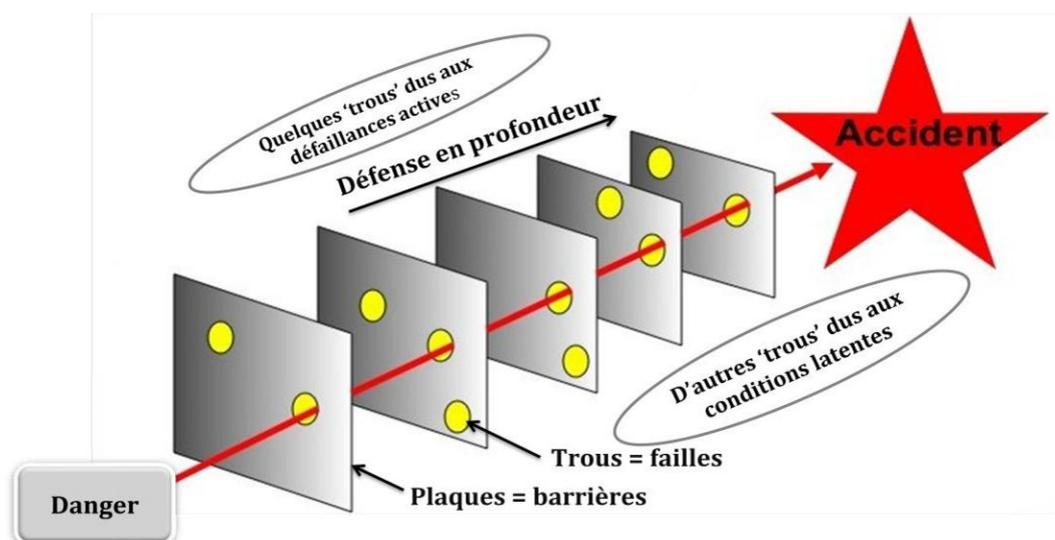


Figure I.3: Concept de défense en profondeur (Modèle de Reason) [Reason et al, 1997]

## I.4 Concept de barrière de sécurité

Le concept de barrière de sécurité ne peut pas être cerné par une définition précise. Afin d'appréhender ce concept, nous essayons dans ce qui suit de fournir quelques détails à propos de ce concept.

Une barrière de sécurité est défini comme un "*Moyen physique et /ou non physique, prévu pour prévenir, contrôler et réduire des événements indésirables ou des accidents*".

Elle désigne aussi "*l'ensemble d'éléments techniques et/ou organisationnels nécessaires et suffisants pour assurer une fonction de sécurité*" [INERIS DRA-17, 2018].

## I.5 Typologie des barrières de sécurité

La typologie des barrières de sécurité est appréhendée selon deux principaux critères: la nature et le mode de fonctionnement de la barrière.

### I.5.1 Typologie des barrières de sécurité selon leur nature

Selon leur nature, les barrières de sécurité peuvent être classées en trois catégories, techniques, humaines et mixtes (voir figure I.4). Dans ce qui suit, nous présentons de façon très succincte la définition de chaque type de barrière.

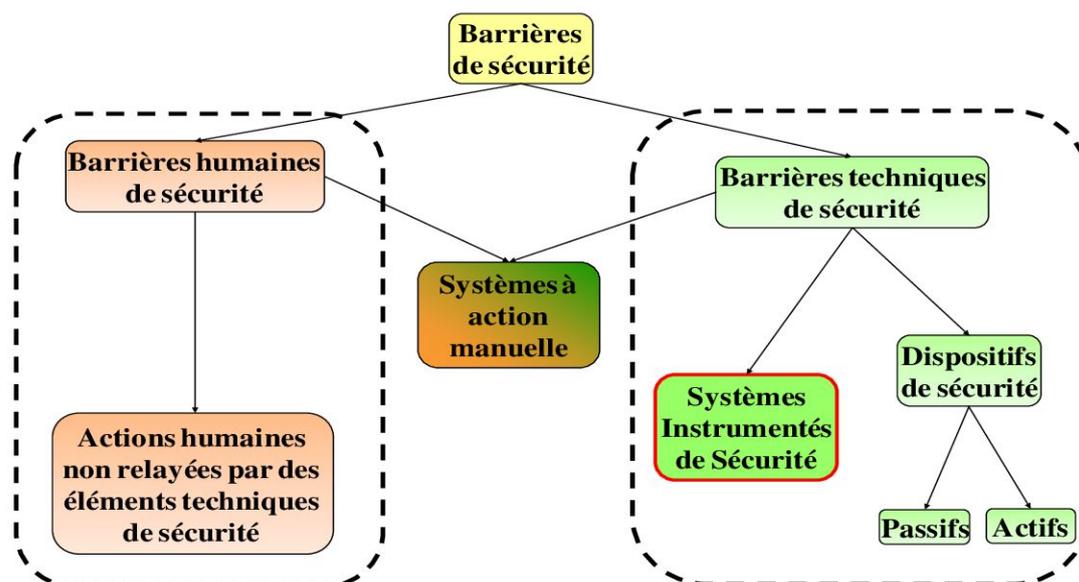


Figure I.4: Types des Barrières de sécurité [INERIS DRA-17, 2018]

#### I.5.1.1 Barrière Technique de Sécurité (BTS)

Constituée généralement d'un dispositif de sécurité (passif ou actif) ou d'un système instrumenté de sécurité (SIS) s'opposant à l'occurrence des événements susceptibles d'aboutir à un accident.

– **Dispositif passif**: Dispositif qui ne met en jeu aucun système mécanique (ressort, levier...etc.) pour remplir sa fonction de sécurité et qui ne nécessite ni action humaine (hors intervention de type maintenance), ni action d'une mesure technique, ni source d'énergie

externe pour remplir sa fonction. Dans cette catégorie on trouve l'écran de protection mécanique ou thermique, disque de rupture, toit flottant de bacs, murs de confinement, arrête-flammes, murs coupe-feu et cuvette de rétention.

– **Dispositif actif** : Dispositif qui met en jeu un système mécanique (ressort, levier...etc.) pour remplir sa fonction. Il peut nécessiter une source d'énergie externe pour fonctionner. Dans cette catégorie, citons les soupapes de sécurité, clapets limiteurs de débit, événements de respiration de bacs avec ressorts, clapet anti-retour.

#### –**Système Instrumenté de Sécurité (SIS)**

Le système instrumenté de sécurité est une combinaison de capteurs, d'unités de traitement et d'actionneurs ayant pour objectif de remplir une ou plusieurs fonctions instrumentées de sécurité dite SIF (Safety instrumented Function). Le rôle assigné à un SIS est la détection des situations dangereuses non contrôlées (augmentation de température ou de pression, fuite de gaz...) pouvant engendrer un accident (incendie, explosion,...etc.) et de mettre ensuite en œuvre un ensemble de réactions nécessaires à la mise en sécurité en un temps spécifié.

#### **1.5.1.2 Barrières Humaines de Sécurité (BHS)**

Elles sont constituées d'activités et procédures humaines sans impliquer les barrières techniques de sécurité pour s'opposer au déroulement d'un accident. Citons par exemple, le respect des règles de circulation sur site, les inspections périodiques, la maintenance préventive et curative et les permis de travail.

#### **1.5.1.3 Systèmes à Action Manuelle de Sécurité (SAMS)**

Combinaison des deux types de barrières précédentes (BTS et BHS). Ce sont des barrières mixtes à composantes techniques et humaines: l'opérateur est en interaction avec les éléments techniques du système de sécurité qu'il surveille ou sur lesquels il agit. Pour ce type de barrière, on trouve le système de protection incendie, vanne manuelle d'isolement de la canalisation, arrêt d'urgence manuel à distance.

### **1.5.2 Typologie des barrières de sécurité selon leur mode de fonctionnement**

Pour maîtriser les scénarios d'accident majeurs, les barrières de sécurité se comportent par plusieurs façons [INERIS, ARAMIS, 2004]. Le schéma de la figure (Figure I.5) décrit cinq fonctions:

– **Fonction d'évitement**: Cette fonction vise à rendre un événement impossible en éliminant toutes ses causes possibles. Elle désigne généralement des modifications profondes des installations. Citons par exemple la substitution des produits dangereux par ceux qui sont non ou moins dangereux.

– **Fonction de prévention**: Cette fonction vise à réduire la probabilité d'occurrence d'un événement par la suppression possible des causes potentielles ou en réduisant leur intensité, sans toutefois pouvoir le rendre impossible. Cette fonction couvre aussi la fonction de détection.

- **Fonction de détection** : Cette fonction sert à détecter les déviations survenues dans un système (surpression, diminution de température,...etc.). À noter que cette fonction seule ne suffit pas généralement à assurer la maîtrise de l'accident et doit être associée à d'autres fonctions comme contrôler ou limiter.

- **Fonction de contrôle** : Il s'agit de maîtriser le déroulement d'une dérive afin de ramener le système dans un état opérationnel sûr.

- **Fonction de limitation ou de réduction** : La fonction « limiter » ou « réduire » consiste à agir sur les conséquences d'un événement afin d'en réduire sa gravité.

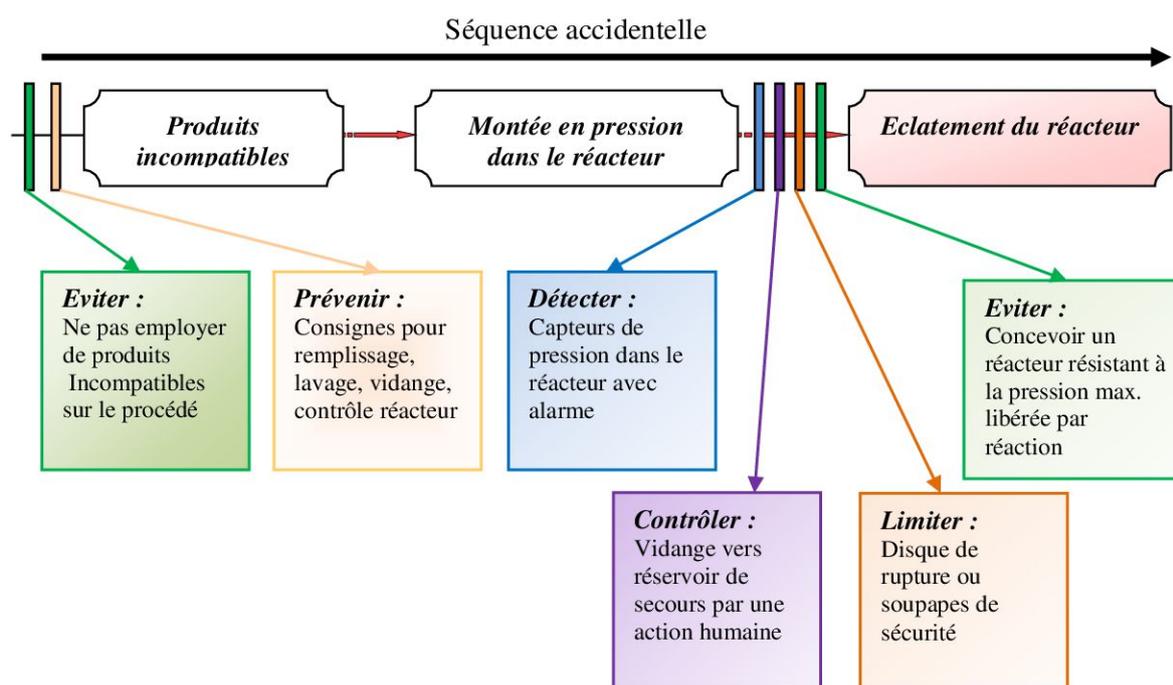


Figure I.5: Schéma illustratif des fonctions de sécurité [INERIS ARAMIS,, 2004].

## I.6 Performance des barrières de sécurité

Le terme performance est introduit récemment dans les démarches de gestion des risques et d'évaluation des performances des barrières de sécurité [INERIS DRA-17, 2018; Bucelli et al., 2018]. En effet, ce concept est étroitement lié aux caractéristiques intrinsèques de la barrière de sécurité à savoir: l'efficacité, le temps de réponse, le niveau de confiance et l'indépendance de la barrière.

En effet, ces paramètres ne sont en réalité que des critères de performance ajoutés aux critères de maintenabilité, de testabilité, de disponibilité et de fiabilité permettant de garantir le niveau de performance d'une barrière dans un temps réel [Florent et all, 2009] .

La figure suivante (Figure I.6) illustre la procédure de sélection d'une barrière de sécurité qui doit en satisfaire au moins aux trois critères suivants:

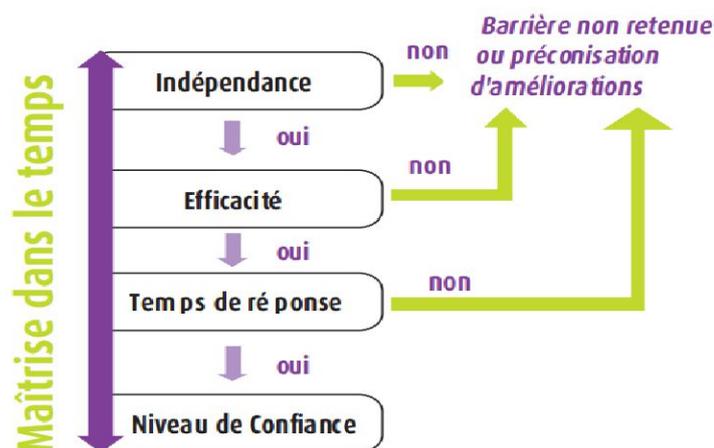


Figure 1.6: Sélection par critères minimaux d'une barrière de sécurité [INERIS, 2009].

## I.7 Évaluation de performance d'une barrière de sécurité

L'évaluation de la performance d'une barrière de sécurité se fait à travers son indépendance, son efficacité, son temps de réponse et son niveau de confiance au regard de son architecture, des pratiques de maintenance, des pratiques des tests...etc.) [IEC 61-508, 2016].

### I.7.1 Critère d'indépendance

La barrière de sécurité doit être indépendante de l'événement initiateur pouvant conduire à sa sollicitation pour pouvoir être retenue en tant que barrière agissant sur le scénario induit par l'événement initiateur. Ses performances ne doivent pas être dégradées par l'occurrence de l'évènement initiateur [INERIS DRA 77, 2009].

### I.7.2 Critère de l'efficacité

L'efficacité est l'aptitude de la barrière de sécurité à remplir la fonction de sécurité pour laquelle elle a été choisie, dans son contexte d'utilisation et pendant une durée donnée de fonctionnement. L'évaluation de l'efficacité repose sur les principes de dimensionnement adapté et de résistance aux contraintes spécifiques [INERIS DRA 77, 2009].

### I.7.3 Critère du temps de réponse

Le temps de réponse correspond à l'intervalle de temps entre le moment où une barrière de sécurité, dans un contexte d'utilisation, est sollicitée et le moment où la fonction de sécurité assurée par cette barrière de sécurité est réalisée dans son intégralité. Rappelons que pour qu'une barrière soit retenue selon ce critère, le temps de réponse de la barrière doit être en adéquation avec la cinétique du phénomène qu'elle doit maîtriser [INERIS DRA 77, 2009].

### I.7.4 Critère de niveau de confiance (NC)

Le niveau de confiance dépend de la probabilité de défaillance à la demande. Il permet de déterminer le facteur de réduction de risques induit par une barrière de sécurité. Cette réduction apportée par cette barrière est en fonction de ce critère qui se calcule de manière conservative par le  $10^{NC}$ .

## I.8 Démarche de gestion des risques

La gestion des risques est l'un des enjeux majeurs de toute activité industrielle. Elle fait partie de la politique globale de l'entreprise et constitue une composante fondamentale de sa réussite et de son amélioration. Aujourd'hui il incombe à tout exploitant de démontrer qu'il gère aux mieux les risques générés par son installation par la mise en place des mesures nécessaires permettant d'assurer la sécurité des personnes, des biens et de l'environnement.

Dans le guide ISO/CEI 51 et 73 [ISO, 1999], la gestion des risques est définie comme "l'ensemble des activités coordonnées, menées en revue de réduire le risque à un niveau jugé tolérable ou acceptable, à un moment donné et dans un contexte donné".

Dans ce contexte, la norme ISO 27005 [ISO/IEC 27005, 2011] propose une démarche itérative de gestion des risques. Ses différentes étapes ainsi que le processus générique de cette démarche sont représentés dans le schéma de la figure suivante (Figure I.7).

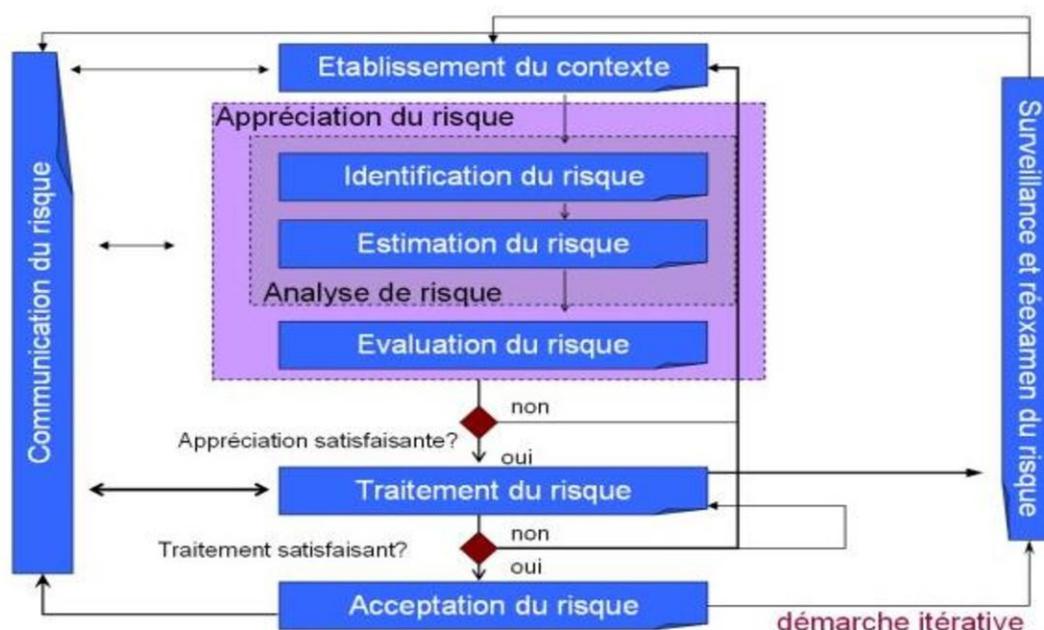


Figure I.7: Processus de gestion des risques [ISO/IEC 27005, 2011].

Les principales étapes sont brièvement expliquées comme suit.

### I.8.1 Analyse du risque

L'analyse des risques occupe une place centrale dans le processus de gestion des risques. Cette étape sert à définir le système ou l'installation à étudier en recueillant toutes les informations et données nécessaires. Dans ce volet, une description à trois niveaux, structurel, fonctionnel et temporel est indispensable afin de mener une analyse pertinente et atteindre les objectifs attendus en matière de gestion des risques. En effet, dans un premier temps, les principales sources de dangers et les scénarios d'accidents doivent être recensés et identifiés. La complexité de certains systèmes étudiés requiert l'utilisation des outils d'analyse aidant à l'identification des dangers tels que la HAZID (HAZards IDentification), HAZOP (HAZard and OPerability Study), APD (Analyse Préliminaire de Dangers) [INERIS-DRA 35. 2006].

Ces outils d'analyse permettent aussi d'identifier les différentes barrières de sécurité existantes dans le système étudié. Une fois le danger est identifié, le risque associé doit être estimé. L'estimation peut être qualitative, semi-quantitative et/ou quantitative en termes de probabilité de son occurrence et de la gravité de ses conséquences sur les personnes, les biens et l'environnement.

### **1.8.2 Estimation du risque**

L'estimation d'un risque se définit comme: « Processus utilisé pour affecter des valeurs à la probabilité et aux conséquences d'un risque. Cette estimation peut considérer le coût, les avantages, les préoccupations des parties prenantes et d'autres variables requises selon l'étape d'évaluation du risque» [ISO/CEI Guide 73, 2002].

### **1.8.3 Évaluation du risque**

Dans cette étape, il s'agit de comparer le risque estimé aux critères d'acceptabilité établis préalablement par l'établissement concerné. En effet, cette évaluation permet de prendre une décision sur l'acceptabilité ou l'inacceptabilité de chaque risque [ISO, 1999], c'est-à-dire, déterminer s'il convient d'accepter le risque tel qu'il est ou de l'en réduire [CCPS, 2009].

### **1.8.4 Acceptation du risque**

L'acceptabilité d'un risque est faite à partir de ses deux paramètres (fréquence et gravité). Le niveau du risque quantifié sera positionné dans une matrice d'évaluation et en fonction des critères d'acceptabilité retenus et le risque estimé qu'on juge de l'acceptabilité ou la non acceptabilité du risque [ISO, 1999]. Si le risque est jugé acceptable le processus de gestion sera terminé et le risque jugé sera surveillé. Dans le cas contraire, le processus continue en passant à l'étape de réduction.

### **1.8.5 Réduction du risque**

Cette étape consiste à mettre en œuvre les différentes mesures et barrières de prévention et de protection afin de réduire l'intensité du phénomène (Atténuation des conséquences) et à diminuer la probabilité d'occurrence par la mise en place de barrières visant à prévenir les accidents (Voir figure I.8).

Outre les améliorations techniques et de fiabilité d'équipements, la prévention passe aussi par une meilleure prise en compte des facteurs de risque liés à l'organisation et aux personnes.

Le choix des actions préventives à engager est effectué en comparant les coûts de leur mise en œuvre avec les coûts des conséquences de risque, en tenant compte de leur probabilité d'apparition. Un suivi régulier de l'évolution des risques est recommandé dans la démarche de gestion des risques afin de contrôler et d'assurer la pertinence des actions préventives engagées et éventuellement de corriger les dispositions prévues [INERIS DRA-007, 2003].

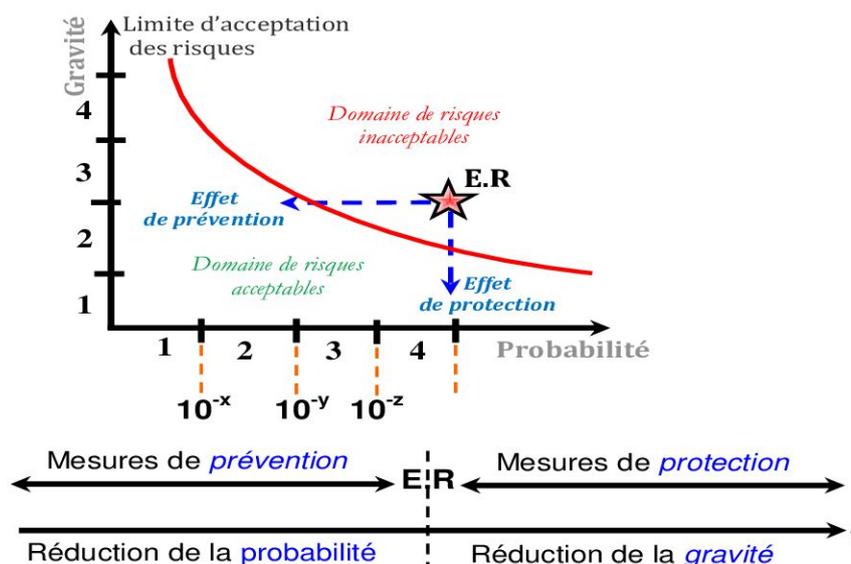


Figure I.8: Principe de réduction du risque [Innal, 2008].

## I.9 Méthodes d'analyse et d'évaluation des risques

Dans cette partie nous allons décrire brièvement les principales méthodes d'analyse des risques. Ces méthodes sont classées en trois principales catégories: qualitatives, semi-quantitatives et quantitatives [INERIS DRA35, 2006]. Dans ces catégories, il existe deux approches d'investigation des événements de «cause à effet»: l'approche inductive et l'approche déductive [Villemeur, 1988] (voir figure I.9):

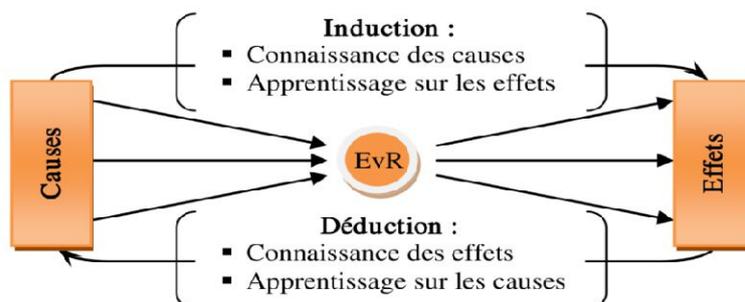


Figure I.9: Approches d'investigation: Inductive et Déductive [Mazouni, 2009].

La démarche déductive nécessite une bonne connaissance des effets de l'accident, on peut donc procéder par déduction afin d'identifier les causes possibles. En revanche, la démarche inductive nécessite une bonne connaissance des causes de l'accident. Logiquement, on se situe donc en amont de l'accident et on essaye de dégager les conséquences possibles relatives à une cause donnée.

### I.9.1 Méthodes qualitatives

L'analyse qualitative des risques constitue un préalable à toutes autres analyses. En effet elle permet une bonne compréhension et connaissance systématique du système étudié et de ses composants [Villemeur, 1988]. Pour une bonne évaluation qualitative du risque, ces méthodes se réfèrent à des observations pertinentes sur l'état du système et surtout sur le

retour d'expérience et les jugements d'experts. Cette approche nécessite alors une très bonne connaissance des différents paramètres et causes liés au système étudié.

De nombreux outils d'analyse et d'évaluation des risques à caractère qualitatif existent. Ils sont rappelés ci-après.

### 1.9.1.1. Analyse préliminaire des risques (APR)

L'analyse préliminaire des risques est un outil à caractère qualitatif utilisé et appliqué dans de nombreuses industries surtout quand il s'agit de connaître et d'évaluer les différents éléments et situations dangereuses dans un système ou une installation en phase de conception [Villemeur, 1988; Desroches, 2009]. Les étapes de cette méthode sont illustrées dans la figure ci-dessous (Figure I.10): Dans un premier temps, cette méthode permet d'identifier et de lister les éléments du système et les événements pouvant conduire à des situations dangereuses et des accidents. À ce niveau, on analyse des séquences d'événements conduisant à un accident. Dans un second temps, il s'agit d'évaluer la gravité des conséquences liées aux situations dangereuses et aux accidents potentiels. Enfin, il doit identifier toutes les mesures préventives et protectives permettant de maîtriser ou d'éliminer les situations dangereuses et les événements causant les accidents potentiels.

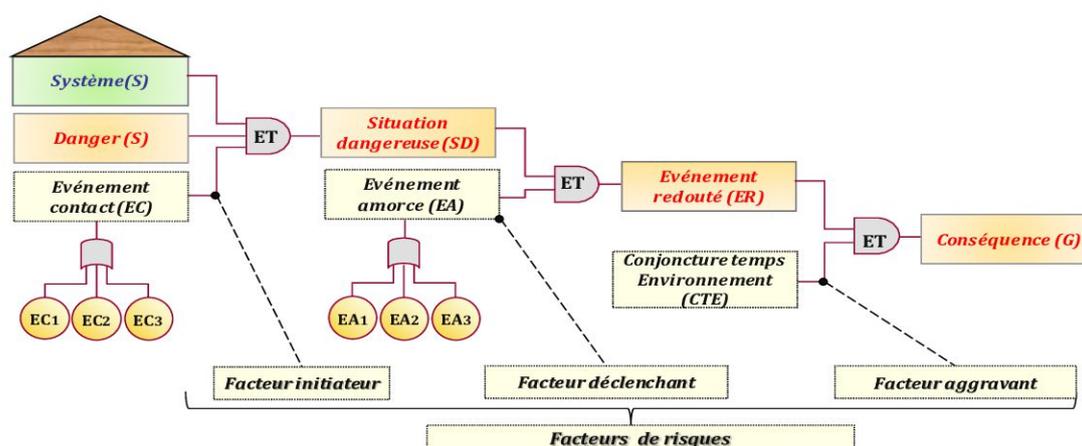


Figure I.10 Scénario d'accident selon le modèle APR

### 1.9.1.2 Hazard and Operability Study (HAZOP)

La méthode HAZOP est un outil qualitatif très utilisé dans l'industrie pétrochimique. Elle consiste à identifier des problèmes potentiels qui peuvent causer des dérives par rapport à la conception et au fonctionnement normal d'un système industriel. Elle sert à analyser les causes et les conséquences issues de ces dérives [IEC 61882, 2016]. Cette méthode est généralement mise en œuvre à la fin de phase de conception et en phase d'exploitation, précisément au début de phase de réalisation des systèmes industriels puisqu'elle s'appuie sur les plans de circulation des fluides et les schémas détaillés PID (Piping and Instrumentation Diagram) du système étudié [INERIS, 2003; CEI 61882, 2001].

En effet, après avoir décomposé le système en parties (lignes de circulation), tous les paramètres associés au fonctionnement du système doivent être identifiés. Généralement

les paramètres rencontrés concernent la température, la pression, le débit et le temps [INERIS DRA-007, 2003]. Ces derniers peuvent subir des contraintes intrinsèques ou extrinsèques qui vont rendre anormal le fonctionnement du système. Citons par exemple:

- Augmentation / diminution de débit.
- Diminution / élévation de la température ou de pression.
- Dépassement du temps...etc.

Ces variations (dérives potentielles) des paramètres engendrent des conséquences potentielles et pour prévenir ces conséquences, HAZOP identifie pour chaque dérive les moyens de détection et les différentes barrières de sécurité prévues pour réduire l'occurrence des accidents liés à ces dérives.

Dans notre étude de cas, cette méthode sera appliquée dans un but d'identification des différents scénarios d'accidents.

## **1.9.2 Méthodes semi-quantitatives**

L'analyse semi-quantitative des risques est une approche intermédiaire entre les approches qualitative et quantitative [Desroches, 1995], [Arthur and Dowell, 1988]. Cette approche a pour but d'enlever l'aspect hautement subjectif et incertain de l'information utilisée dans l'approche qualitative en lui offrant plus de précision et d'exactitude, et en même temps pour assouplir le manque de la robustesse des données de l'approche quantitative [Hefaidh et al., 2019]. De nombreuses méthodes et outils d'analyse et d'évaluation à caractère semi-quantitatif sont développés. Certains d'entre eux sont rappelés ci-après.

### **1.9.2.1 Analyse des couches de protection (LOPA)**

L'analyse des couches de protection est une méthode semi-quantitative orientée barrières [CCPS, 2001], destinée à la maîtrise des risques d'accidents majeurs. Son principe consiste dans un premier temps à identifier les différents scénarios d'accidents moyennant une analyse qualitative des risques du type HAZOP [IEC61511, 2003]. Puis de déterminer l'enchaînement des événements initiateurs et intermédiaires pouvant conduire le système à cet événement. Il s'agit ensuite d'évaluer la robustesse des couches de protection mises en place en affectant des probabilités de défaillance à la demande (PFD) pour chaque couche de protection [Bourareche, 2009].

Rappelons, que son efficacité réside dans l'identification minutieuse des couches de protection indépendantes (IPL: Independent Protection Layers). Ces dernières, à la différence des barrières de sécurité ordinaires, possèdent des spécificités particulières de fonctionnement à savoir [CCPS, 2001]:

- La capacité de détecter une anomalie dans un système pour laquelle elle est conçue.
- La capacité de décider d'agir ou non vis-à-vis de cette anomalie détectée.
- La capacité de faire dévier le scénario d'accident vers une situation sûre.

D'autres critères de base sont retenus pour pouvoir qualifier une barrière de sécurité comme une IPL tels que, l'efficacité, l'indépendance et la testabilité. La figure (figure I.11) montre les différents types des IPL qui se trouvent dans la des systèmes et des installations industrielles surtout chimiques et pétrochimiques.

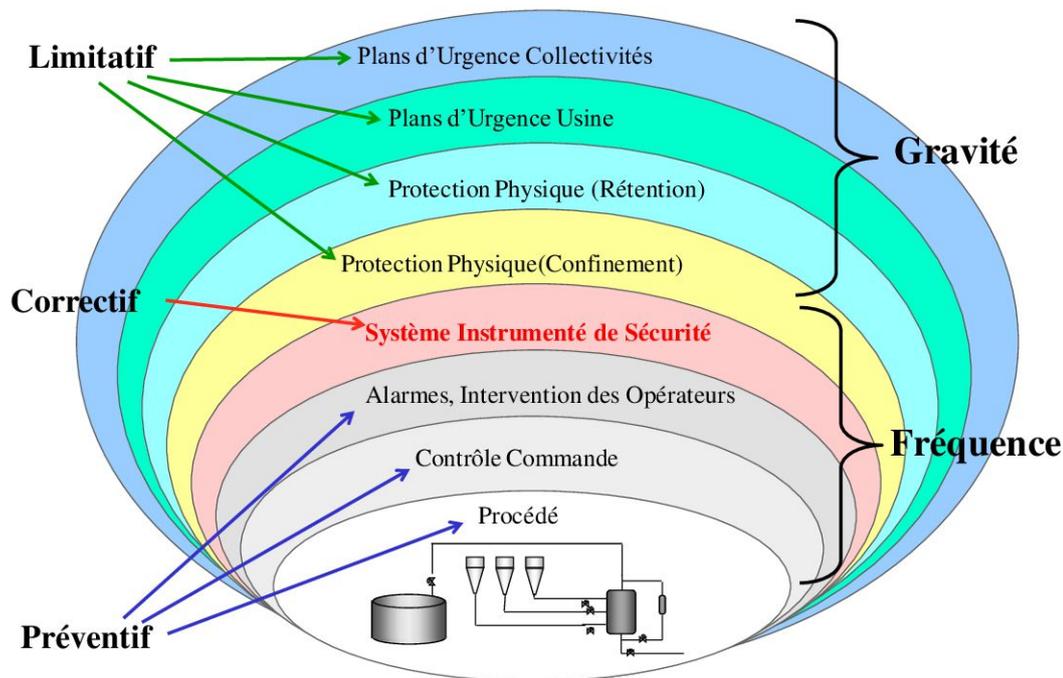


Figure I.11: Couches de réduction de risques [CCPS, 2001]

Une fois les événements initiateurs sont identifiés et leurs fréquences d'occurrence sont ajustées, LOPA, moyennant l'arbre des événements (AdE) permet la détermination de la fréquence d'occurrence de chaque séquence d'accident en multipliant la fréquence d'occurrence de cet événement initiateur par le produit des PFD des couches de protection existantes. Puis, une estimation des fréquences de conséquence des séquences d'accidents est faite. En fin, il reste à décider l'acceptabilité ou l'inacceptabilité de l'accident à travers son évaluation par rapport aux critères d'acceptabilité [CCPS, 2001].

Le modèle AdE illustré par la figure (I.12) permet de représenter un scénario de LOPA complet en prenant en compte les différentes séquences possibles jusqu'aux conséquences aux limites.

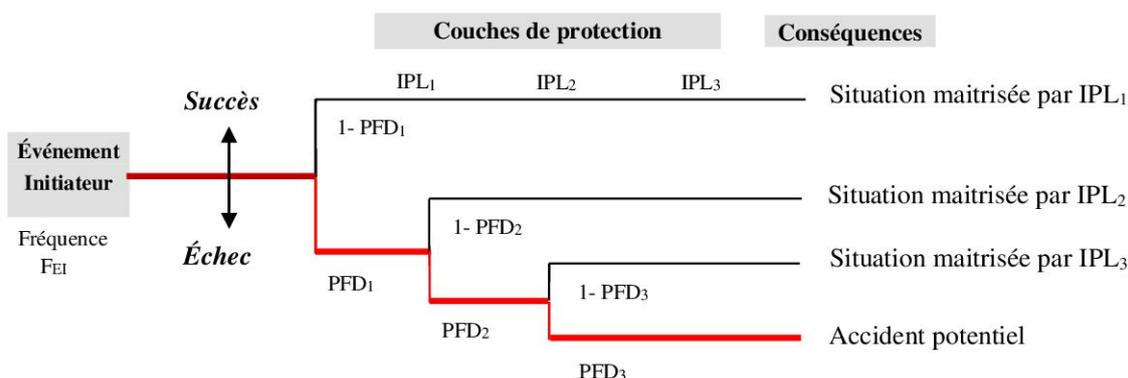


Figure I.12: Exemple d'un AdE avec des couches de protection indépendantes.

### 1.9.2.2. Graphe de risque étalonné

Le graphe de risque étalonné est une méthode semi-quantitative appliquée largement dans de nombreux domaines, pétrolier, chimique, nucléaire...etc. [IEC61511, 2003]. Cette méthode a pour but de déterminer le niveau d'intégrité de sécurité (SIL) d'une fonction instrumentée de sécurité caractérisant un système instrumenté de sécurité (SIS) [IEC61511, 2003] en se basant sur l'équation de risque:

$$R = f \cdot C \tag{I.1}$$

Où :

**R** : Risque en l'absence de systèmes de sécurité,

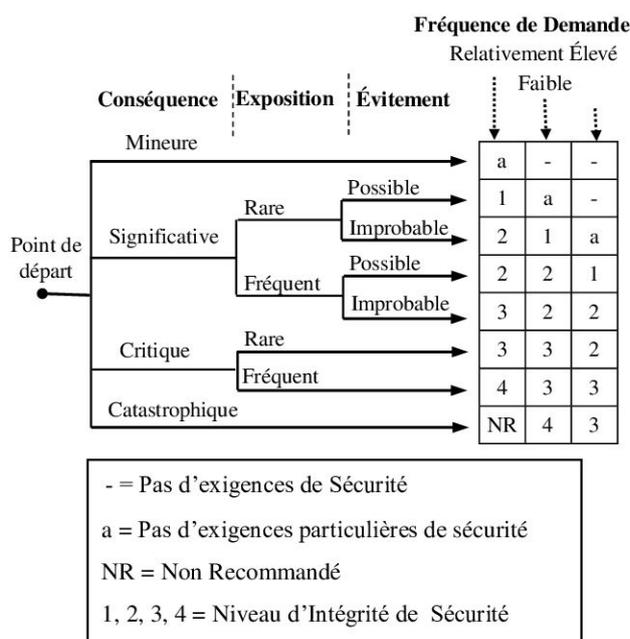
**f** : Fréquence d'occurrence de l'événement dangereux,

**C** : Conséquence de l'événement dangereux,

Il est supposé que la fréquence de l'événement dangereux définie en fonction de:

- La fréquence et durée d'exposition dans une zone industrielle (F),
- La possibilité d'éviter l'événement dangereux (P),
- La probabilité que l'événement dangereux se produise en l'absence des systèmes relatifs à la sécurité (W).

Par conséquent le risque est défini en fonction de quatre paramètres qui sont : C, F, P, W. Tous ces paramètres doivent être identifiés et estimés en leurs affectant des valeurs numériques. L'affectation de ces valeurs est faite de sorte qu'une fois les valeurs sont combinées, l'évaluation est classée par ordre de l'importance de risque. Tous ces paramètres seront combinés ensemble et représentés par un diagramme appelé graphe de risque étalonné (Figure I.13) ainsi expliqué par le tableau (I.1).



Paramètres de risque	Description qualitative	Description quantitative
Conséquence (C)	Mineure: Blessures réversibles	Pas de mort par événement
	Significative: Un mort ou blessures irréversibles	]10 <sup>-2</sup> , 10 <sup>-1</sup> ] morts probables par événement
	Critique: Quelques morts	]10 <sup>-1</sup> , 1] morts probables par événement
	Catastrophique: Plusieurs morts	> 1 morts probables par événement
Exposition (F)	Rare	< 10% du temps
	Fréquente	≥ 10% du temps
Évitement (P)	Possible	Une probabilité ≥ 90%
	Improbable	Une probabilité < 90%
Fréquence de demande (W)	Très faible	< 1 dans 30 ans ≈ < 0.03 par an
	Faible	1 dans ]3, 30] ans ≈ [0.03, 0.3] par an
	Relativement élevé	1 dans ]0.3, 3] ans ≈ [0.3, 3] par an

Tableau I.1: Exemple de définition qualitative et quantitative des paramètres du risque.

Figure I.13: Graphe de risque avec une description qualitative [IEC 61 511, 2003]

### 1.9.3. Méthodes quantitatives

L'analyse quantitative des risques est considérée comme l'approche la plus adéquate pour une bonne prise de décision sur les risques et les performances des barrières de sécurité. Cette approche consiste à caractériser les différents paramètres d'analyse des risques par des mesures probabilistes [Desroches, 1995], L'obtention de ces mesures passe généralement par un traitement mathématique [Villemeur, 1988] en prenant en compte les données relatives aux différents paramètres évalués et aussi aux informations qui sont de nature quantitative.

Nous présentons quelques méthodes quantitatives parmi les plus utilisées en analyse des risques et évaluation des performances des barrières de sécurité, en l'occurrence l'arbre des événements, l'arbre de défaillances, la méthode de nœud papillon, et la méthode BORA qui constitue le cadre méthodologique de cette thèse.

#### 1.9.3.1. Arbre des événements (AdE)

L'arbre des événements est une méthode déductive [Villemeur, 1988] qui consiste à partir de l'événement initiateur conduisant à un événement indésirable à envisager l'échec ou le succès des fonctions de sécurité puis définir les événements susceptibles de se produire en aval de l'événement initiateur, les barrières de sécurité et leurs fonctions doivent être identifiées en leurs affectant des probabilités de défaillance. Comme il est montré dans la figure (I.14), L'AdE construit permet temporellement d'identifier les différentes séquences d'événements susceptibles de conduire ou non à des conséquences aux limites et les chemins les plus dangereux conduisant à des conséquences catastrophiques sont ensuite analysés en détail. La fréquence d'occurrence de l'événement initiateur est multipliée par probabilités de défaillances des barrières de sécurité existantes et pouvant empêcher le scénario d'accident.

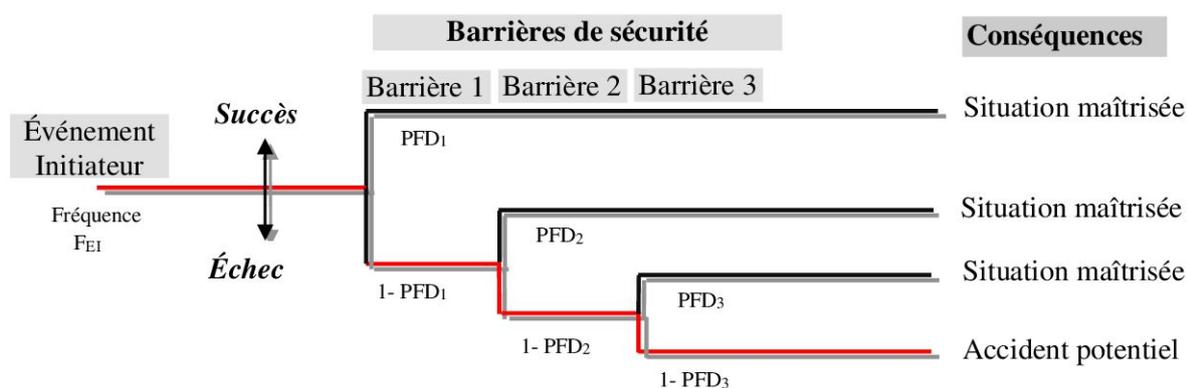


Figure I.14: Schéma d'un AdE avec des barrières de sécurité.

#### 1.9.3.2. Arbre de défaillances (AdD)

L'arbre de défaillances est une méthode quantitative utilisée largement dans le domaine de la sûreté de fonctionnement [Villemeur, 1988]. C'est une démarche d'analyse arborescente probabiliste [IEC 61025, 2016]. En effet, partant d'un événement indésirable bien défini, il

s'agit d'identifier les combinaisons d'événements élémentaires et intermédiaires pouvant conduire le système à l'occurrence de cet événement.

L'analyse par arbre de défaillances est la méthode la plus couramment utilisée dans le cadre d'études de fiabilité, de disponibilité ou de sécurité des systèmes.

Notons que cette méthode qui fait partie de notre approche, sera appliquée pour la modélisation et la détermination des défaillances des barrières de sécurité dans l'étude de cas (Chapitre III).

### 1.9.3.3. Méthode de Nœud Papillon

Le «Nœud Papillon» est une approche arborescente probabiliste développée à partir d'une combinaison entre l'Arbre des Evènements et d'un Arbre de Défaillances. Généralement elle est recommandée pour l'évaluation des évènements hautement critiques. Comme montré sur la figure (Figure I.15), le point central du est un «Evénement Redouté Central» qui peut désigner généralement une situation dangereuse telle qu'une perte de confinement, une surpression,...etc. La partie gauche sert à identifier les causes de cette situation dangereuse, tandis que la partie droite du nœud sert à déterminer les conséquences de cet événement redouté central [INERIS-DRA-76, 2015].

Chaque scénario d'accident relatif à un évènement redouté central est représenté à travers un chemin possible allant des évènements indésirables courants jusqu'à l'apparition des effets majeurs.

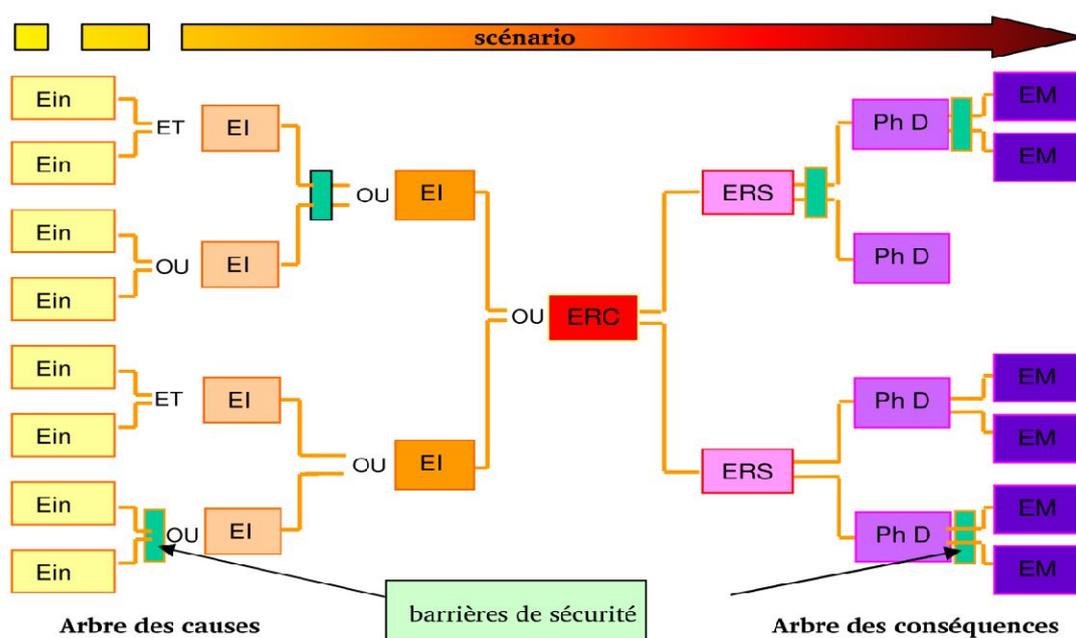


Figure I.15: Schéma illustratif du modèle nœud papillon [INERIS-DRA-76, 2015].

Dans le domaine d'analyse et d'évaluation des risques, ces méthodes et autres ont des avantages et des limites, leur application est fonction de leurs spécificités et des objectifs attendus de l'étude.

## **I.10 Aperçu sur les incertitudes: concepts de base**

### **I.10.1 Concept d'incertitude**

Plusieurs définitions sont attribuées au concept d'incertitude. Nous proposons dans cette section les plus connues de ce concept. Selon Boissier [Boissier, 1993], ce concept résulte essentiellement d'une épreuve dont le résultat n'est pas connu a priori et pourrait changer si on la recommençait, il représente la variabilité intrinsèque d'un phénomène. Bouchon-Meunier [Bouchon-Meunier, 1995], de sa part, définit l'incertitude comme un doute sur la validité d'une information provenant d'une fiabilité relative de l'intermédiaire d'observation. Il voit aussi que l'incertain est relatif à sa vérité, entendue au sens de sa conformité à une réalité. Dans [Oberkampf et al. 2002], nous distinguons de plus l'erreur, une lacune identifiable dans la phase de modélisation ou d'expérimentation qui n'est pas due à un manque de connaissance.

Ayyub et Klir dans [Ayyub et Klir, 2006] l'interprètent comme l'incomplétude de la connaissance qui est due à des difficultés intrinsèques à acquérir la connaissance. Et selon Haines [Haines, 2009], l'incertitude est l'incapacité à connaître le vrai état d'un système. Dubois [Dubois, 2010] prétend que toutes les incertitudes sont de nature épistémique. Seulement il reconnaît que l'incertitude peut avoir plusieurs origines à savoir être due à la variabilité naturelle d'un phénomène et à des informations incomplètes ou contradictoires. Ensuite Blockley [Blockley, 2013] propose une définition de l'incertitude dans un espace tridimensionnel comportant l'axe de l'aléatoire (randomness) qui signifie un manque d'un motif ou schéma spécifique, l'axe de l'incomplétude (incompleteness) qui se réfère à ce qu'on ne connaît pas et l'axe du flou (fuzziness) qui indique une imprécision ou ambiguïté. Il y a au moins deux causes de l'incertitude [Dubois, 2003]:

- ✓ La variabilité des phénomènes. C'est-à-dire, la réponse probabiliste en fonction de la fréquence observée.
- ✓ Le caractère incomplet de l'information disponible; où les réponses sont plus ou moins précises en fonction de la connaissance détenue par les individus.

### **I.10.2 Types d'incertitudes**

Bien qu'il existe une variété de classification des incertitudes, la classification la plus courante dans la littérature étant de distinguer les incertitudes en deux types: incertitude aléatoire (stochastique ou objective) et incertitude épistémique (subjective). Le premier est de type irréductible et dû à la variabilité naturelle des phénomènes aléatoires associés à n'importe quel processus variable ou déduites d'une simple statistique.

Cependant, le deuxième est de type réductible et dû à un manque de connaissances sur les valeurs à attribuer à certaines quantités, il peut être réduit davantage moyennant des sources d'information et de données (recueil de données. consultation d'experts. essais accélérés...etc.) [Hoffman et Hammonds 1994; Helton et al. 2004]. En effet, comme le montre la figure (Figure I.16), ces incertitudes de type épistémique sont classées en trois catégories: paramétrique, de complétude et de modélisation:

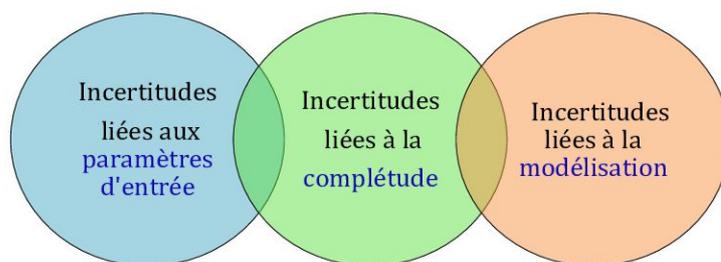


Figure 1.16: Catégories d'incertitudes de type épistémique

### **1.10.3 Incertitude dans le domaine d'analyse des risques**

Dans le cadre d'analyse et d'évaluation des risques [Markowski et al, 2010; Sallak et al, 2008; Le Duy, 2011], il a été constaté que les incertitudes épistémiques liées aux paramètres, aux modèles et à l'incomplétude des informations sont imputables aux méthodes d'analyse des risques et impactant la qualité des résultats d'évaluation de ces méthodes, d'où la nécessité de leur prise en compte dans tout processus décisionnel en matière de maîtrise des risques.

#### **IV.10.3.1 Incertitude paramétrique**

L'incertitude paramétrique est l'incertitude des valeurs observées ou mesurées [Lloyd et Ries, 2007]. Ces valeurs servent de paramètres entrants d'un modèle (les inputs). Leur incertitude se propage dans ce dernier et engendre de l'incertitude dans les résultats sortants (les outputs). Selon Lloyd et Ries [Lloyd et Ries, 2007], les principales sources d'incertitudes des paramètres sont l'imprécision des mesures empiriques, leur mauvaise représentativité de la réalité et le manque de données.

Les valeurs de ces paramètres ne sont pas statistiquement estimées ni disponibles sur terrain induisant par conséquent une certaine incomplétude qui entache ces paramètres. Théoriquement parlant, il faut disposer d'un nombre infini de données observées pour que l'estimation puisse être considérée comme dénuée d'erreur. Vu que ceci est impossible en pratique, il en résulte la présence d'incertitude sur ces paramètres. Les paramètres utilisés dans un modèle peuvent aussi être sujet à une variabilité naturelle. Celle-ci est associée à l'incertitude inhérente aux processus physiques naturels dont l'occurrence varie d'un endroit à l'autre et d'un temps à l'autre [Abrahamsson, 2002]. Ainsi, leur occurrence et leur ampleur (intensité) ne peuvent pas être prédits avec précision. D'autres sortes d'incertitude paramétrique sont mentionnés par Morgan et Henrion, et Haines [Morgan and Henrion, 1992; Haines 2009] comme le manque de consensus d'experts, sensibilité des conditions initiales d'un système, échantillon trop petit,...etc.

Dans les modèles d'analyse des risques et des performances des barrières de sécurité, cette incertitude est fréquemment rencontrée et dépend essentiellement de valeurs des paramètres du modèle utilisé (fréquences d'occurrence, probabilités de défaillances, scores...etc.). Leur incertitude se propage dans le modèle appliqué et engendre de l'incertitude dans les résultats

sortants en fonction des modèles mathématiques de traitement. Aussi, dans les études semi-probabilistes et probabilistes, les analystes ont souvent tendance à utiliser des valeurs moyennes uniques ou des intervalles de confiance issus de la littérature ou du retour d'expérience ou du jugement d'experts comme données représentatives. Cependant, en plus de l'incertitude entachant ces données (intervalles larges et valeurs issues de statistiques non fiables) il y a une déclaration ferme (problème de rigidité) pouvant exclure d'autres valeurs possibles [Ouazraoui et al. 2013].

### ***1.10.3.2 Incertitude liée aux modèles***

Ce type d'incertitude résulte de simplifications et d'hypothèses relatives à un manque de connaissance sur un système ou sur un comportement d'une structure dans des conditions variées [Ditlevsen 1983]. Il survient du fait que n'importe quel modèle que ce soit de nature conceptuelle ou mathématique n'est qu'une représentation simplifiée de la réalité du phénomène ou du système étudié [CCPS, 2000; Markowski et al, 2010]. Ces modèles ne peuvent jamais également être structurés de manière à tenir compte de différentes situations et séquences des scénarios. Donc, le niveau d'incertitude dépend à la fois de la bonne connaissance du phénomène physique étudié et du degré de simplification adopté et des hypothèses formulées par les experts pour le modéliser [Abrahamsson, 2002; Le Duy, 2011].

Pratiquement parlant, aucun modèle ne peut représenter parfaitement une situation ou un processus réel en raison des hypothèses formulées au cours du processus de modélisation. En effet, la quasi-totalité de ces modèles ne sont que des approximations qui ne reflètent pas entièrement les phénomènes étudiés surtout en absence de mesure des degrés relatifs de différences entre un système physique et un ensemble de modèles se rapprochant du système. Ainsi, l'incertitude est impliquée dans le choix du meilleur modèle à partir d'un ensemble de modèles. Cette incertitude est principalement épistémique car elle vient de manque de connaissances. Une description complète de différentes sources d'incertitude de la structure du modèle est offerte dans [Morgan et Henrion 1992; Haines, 2009].

### ***1.10.3.3 Incertitude de complétude (Incomplétude)***

L'incertitude de complétude présente une absence de connaissances sur les paramètres caractéristiques du système. Elle peut être due à l'impossibilité d'obtenir certains renseignements ou à un problème au moment de la mesure de la connaissance [Dubois et Prade. 1994]. Selon [Bouchon-Meunier, 1990], c'est une incomplétude des informations partielles sur certaines caractéristiques du système. Elles peuvent être dues à l'impossibilité d'obtenir certains renseignements sur un problème au moment de la captation de la connaissance ou à l'existence d'informations générales sur l'état d'un système, habituellement vraies, soumises à des exceptions que l'on ne peut pas énumérer ou prévoir.

Dans les modèles d'évaluation des risques, ce type provient du fait que le modèle d'évaluation des risques ne prend pas en considération tous les événements contribuant au

risque [Le Duy, 2011]. Aucun modèle d'analyse des risques ne peut prendre en considération par exemple tous les événements initiateurs possibles. Ce type d'incertitudes ('incomplétude) est inhérent à la phase qualitative de l'analyse (phase d'identification). Aussi, il est difficile de quantifier qu'il est dû principalement à l'absence de connaissances sur les paramètres caractérisant le système. En effet, il peut être dû à l'impossibilité d'obtenir certains renseignements ou à un problème survenu durant la mesure de la connaissance [Dubois et Prade, 1994].

Dans ce contexte, nous avons juste rappelé les types d'incertitudes évoquées dans la littérature. Dans cette optique, de nombreuses applications floues et possibilistes de traitement des incertitudes et des connaissances imparfaites utilisées dans divers domaines y compris l'analyse des risques sont développées à savoir, [kumar et al. 2005; Chan et al, 2007; Tanaka et al. 1983; Singer, 1990; Liang and Wang, 1993; Soman and Misra, 1993; Lai et al, 1988; Dumitrescu et al, 2002; Markowski, 2007; Ouzraoui et al, 2013],...etc.

## **I.11 Méthodologie d'analyse des risques retenue**

La méthode BORA est une approche relativement récente dédiée à l'analyse des risques et à l'évaluation des performances des barrières de sécurité [Sklet et Haugen, 2004; Aven et al, 2006a ; Haugen et al, 2010]. Elle combine les deux aspects qualitatif et quantitatif d'analyse des risques et des barrières de sécurité, notamment l'analyse par les diagrammes bloc barrières, les arbres de défaillance et les diagrammes d'influence de risques en introduisant le jugement d'experts. Plus spécifiquement, il examine les barrières de sécurité au regard des facteurs techniques, humains et organisationnels qui influencent leurs performances. En effet, il constitue un outil puissant pour l'analyse des facteurs d'influence des risques (RIF<sub>S</sub>) qui pourraient avoir un impact sur les défaillances des barrières de sécurité et l'occurrence des accidents.

### **I.11.1 Principe de la méthode BORA**

La méthode BORA comporte cinq principales étapes décrites dans la section II.4 du chapitre II. Les modèles de base utilisés par la méthode BORA sont : la méthode du diagramme bloc barrières (DBB), la méthode de l'arbre de défaillances (Add) et la méthode de diagramme de fluence de risque. Ces modèles sont combinés pour fournir une analyse opérationnelle détaillée des risques, des barrières de sécurité et des facteurs opérationnels de l'environnement industriel [Vinnem et al., 2008; Rausand, 2011; Haugen et al., 2010; Duijm, 2008; Sklet et al., 2004; Bourareche et al., 2018a ; Bourareche et al., 2018b].

### **I.11.2 Déroulement de la méthode BORA**

La démarche généralement retenue pour mener une analyse par la méthode BORA est illustrée par la figure (Figure I.17). Cette démarche est basée sur différents modèles génériques de risque qui sont communément utilisés dans l'évaluation des risques.

La même figure (Figure I.17) montre les principales étapes de l'élaboration de cette méthode et leur relation séquentielle [Haugen et al., 2010].

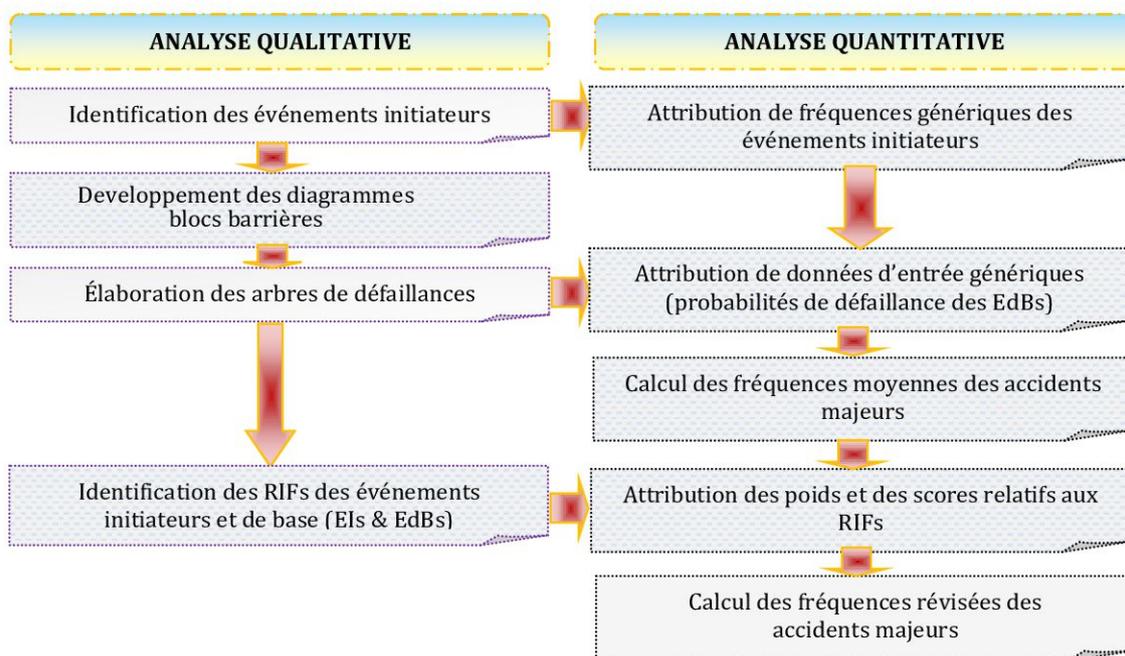


Figure I.17: Procédure de BORA conventionnelle [Haugen et al., 2010].

### I.11.3 Avantages et limites de la méthode BORA

BORA présente les avantages suivants:

- BORA est un outil très pratique et flexible permettant de déterminer les facteurs d'influence des risques qui peuvent altérer les performances des barrières de sécurité;
- BORA prend en compte les facteurs opérationnels (humains, techniques et organisationnels) qui sont rarement prises en compte dans les autres approches;
- Sa robustesse réside dans son caractère combinatoire d'analyse qui est à la fois qualitatif et quantitatif, inductif et déductif en combinant les connaissances de base des méthodes, arbre de défaillances, arbre d'événements et le diagramme de fluence des risques;
- BORA offre une nouvelle vision améliorée d'analyse des risques et d'évaluation des performances des barrières de sécurité en introduisant une analyse des facteurs d'influence du risque en attribuant aux RIFs des "Poids" et des "Scores"[Haugen et al., 2010];
- BORA est une approche déterministe complémentaire qui permet d'analyser les barrières de sécurité en profondeur à travers d'une évaluation purement expertisée qui est considérée comme un appui de son aspect déterministe.

Cependant BORA présente certaines limites [Rausand, 2011]:

- Les RIFs ne sont pas toujours indépendants (Influence des RIFs entre eux), alors que leur estimation ne tient pas en compte cette dépendance. Ce qui rend leur évaluation incertaine quelque part;

- Selon Haugen (2005), les facteurs d'influence du risque (RIFs) ne sont pas toujours bien définis. Notamment, dans le cas des facteurs externes ayant une influence sur les performances des barrières de sécurité;
- L'objectivité et la robustesse des résultats de BORA dépendent fortement, d'une part, de la qualité du jugement d'experts. Cependant, il est souvent difficile de trouver un jugement d'experts pertinent dépourvu de toute incertitude.

## **I.12. Problèmes soulevés dans le cadre de BORA**

### **I.12.1 Problème de prise en compte de l'environnement opérationnel dans la criticité des barrières de sécurité**

Parmi les inconvénients révélés dans la méthode BORA, l'absence d'une prise en compte de l'environnement opérationnel dans l'ordonnancement des éléments constitutifs et de criticité des barrières de sécurité et l'absence d'une vision stratégique d'optimisation et de priorisation des actions de maintenance et d'inspection des éléments constituant les barrières de sécurité (détecteurs des déviations, alarmes, vannes de sécurité, soupapes de sécurité,...etc.).

Dans cette optique, et afin de remédier à ce problème, nous proposons dans le chapitre II une intégration d'une analyse d'importance de criticité «CIA: Criticality Importance Analysis» dans la méthode BORA en utilisant le facteur d'importance critique" [Bourareche et al., 2020]. L'idée de cette intégration vient de faite que la méthode BORA, dans sa partie d'évaluation des performances des barrières de sécurité ne fournit pas d'information nécessaire en matière de l'importance fiabiliste des événements de base constituant les barrières de sécurité et par conséquent l'importance fiabiliste des barrières de sécurité.

Citons les principaux raisons qui ont motivé cette proposition d'intégration:

- Etant donné que les facteurs d'importance critiques (CIFs) sont les seules indicateurs pouvant nous informer sur les éléments les plus critiques des barrières de sécurité, leur intégration dans la méthode BORA semble très bénéfique pour la planification continue du plan d'action de maintenance préventive;
- Aussi, le classement (de plus critique au moins critique) de ces éléments selon leurs criticités aide les services de maintenance et d'instrumentation à préconiser un échéancier d'inspection et de maintenance selon priorisation selon des éléments constituant les barrières de sécurité;
- Cette approche proposée "BORA-CIA" aura l'avantage de signaler les facteurs d'influence des risques (RIFs) dites, contraintes opérationnelles et environnementales ayant un impact sur les criticités des éléments des barrières de sécurité. On serait donc en mesure de répondre à cette question: sur quels facteurs de risque doit-on agir pour améliorer de façon efficace et moins coûteuse la performance des barrières de sécurité?

- Cette étude d'importance semble être un outil d'aide pour optimiser les paramètres de maintenance des éléments des barrières de sécurité afin de conserver ou d'augmenter leurs performances (la disponibilité des barrières de sécurité), en prenant en compte les RIFs influençant les criticités de ces barrières, comme par exemple, la compétence de l'opérateur de maintenance, l'indisponibilité de composant pour la maintenance.

Dans le deuxième chapitre, nous discuterons en détail l'approche développée BORA-CIA qui sera une extension de la méthode BORA conventionnelle [Bourareche et al., 2020]. Nous expliquons l'intérêt apporté par cette analyse dans l'évaluation des performances des barrières de sécurité. Le troisième chapitre sera consacré à la validation de cette approche [Bourareche et al., 2020].

### I.12.2 Problème des imperfections et incertitudes

Le caractère exhaustif de BORA, comportant l'aspect qualitatif, quantitatif et du jugement d'experts, incite BORA à revêtir toutes les sortes d'incertitudes. En effet, en se référant au modèle global de BORA (voir Figure. II.2), les incertitudes paramétriques se propagent à travers ses modèles au sens vertical et horizontal, ce qui génère une incertitude dans le modèle global. Comme montre la figure (Figure I.18), la propagation de l'incertitude de la structure du modèle est aussi mise en œuvre en combinaison avec la propagation de l'incertitude de paramètres. Il est très important de prendre en compte chacune de ces sources de manière appropriée afin d'apporter les améliorations nécessaires dans cette approche quant à la prise de décision concernant les performances des barrières de sécurité.

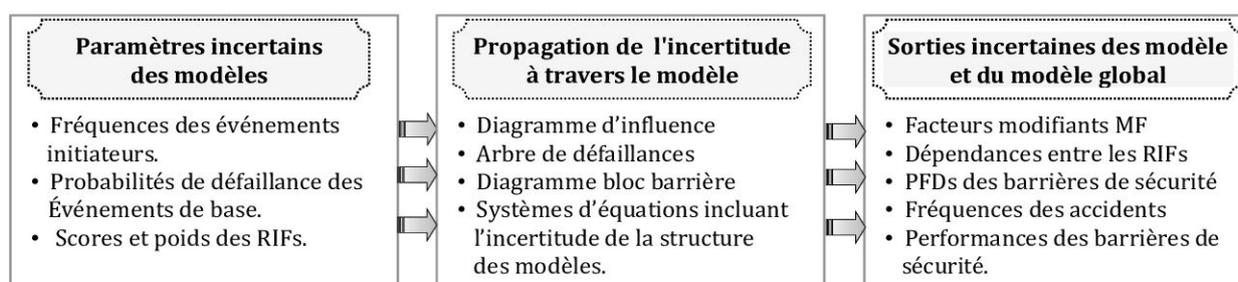


Figure I.18: Illustration du principe de propagation des incertitudes dans BORA

En présence de ces imperfections, des théories adéquates telles que la théorie des ensembles flous [Zadeh,1965], la théorie des possibilités [Zadeh,1978; Dubois,1988] et la théorie des fonctions de croyance [Shafer,1976; Smets,1994; Smarandache et Dezert, 2009] peuvent être mobilisées pour représenter toutes ces formes d'imperfection, nécessitant une démarche très rigoureuse permettant:

- L'identification des incertitudes de paramètres d'entrée permettant d'identifier les paramètres d'entrée incertains, leurs types d'incertitude et leurs corrélations;
- La Propagation des incertitudes de paramètres permettant de propager les incertitudes de paramètres tout en considérant les corrélations ;

- La modélisation et de propagation des incertitudes liées à la structure du modèle permettant de modéliser et propager les incertitudes associées à la structure du modèle;
- L'analyse de sensibilité permettant de tester l'effet des sources d'incertitudes.

### **I.12.3 Problème liés au jugement d'experts**

Dans le cadre de BORA, le jugement d'expert intervient dans ses deux aspects, qualitatif et quantitatif. Ceci est dû, d'une part à l'absence des données historiques et statistiques sur les paramètres d'entrée (fréquences des événements initiateurs, les PFD (Probability Failure on Demand) des barrières de sécurité), et d'autre part, à l'imperfection des connaissances et informations utilisées par BORA (données qualitatives des scores et des poids des RIFs). À ce titre, il semble que la robustesse des résultats de BORA ne peut être atteinte qu'à l'aide du jugement d'expert.

Dans cette optique, nous essayons de fournir quelques détails à propos des incertitudes de jugement d'experts inhérents à cette méthode.

#### ***I.12.3.1 Incertitude liée à la détermination des intervalles des valeurs moyennes***

Etant donné que la détermination des intervalles de confiance des probabilités de défaillance [ $P_{inf}$ ,  $P_{sup}$ ] incluant les probabilités moyennes de défaillance  $P_{moy}$  dépend entièrement de l'étape de d'attribution des scores (voir section II.4.6. Chapitre II). Dans cette étape, on peut constater que les intervalles proposés sont déduits à partir de l'échelle de cotation des scores des RIFs. Ceci dit, qu'ils sont aussi entachés d'incertitude.

#### ***I.12.3.2 Incertitudes liées à la quantification des facteurs d'influence (RIFs)***

La quantification des RIFs est basée essentiellement sur le jugement d'expert qui est une source de données incontournable dans l'application de la méthode BORA. Dans ce qui suit, nous évoquons les incertitudes révélées par ce jugement:

##### ***- Incertitude liée à l'attribution des poids ( $W_i$ )***

La procédure d'attribution des poids des RIFs est basée sur une échelle ordinale à cinq niveaux (10-8-6-4-2) correspondant respectivement aux degrés d'importance des RIFs (allant de forte importance à faible importance) (voir tableau II.1. Chapitre II). À ce niveau, le paramètre du poids ( $W_i$ ) est estimé qualitativement par un expert en lui affectant des variables linguistiques telles que: élevé, moins élevé, moyen, relativement faible et faible qui correspondent à l'échelle proposée.

Toutefois, il est souvent difficile d'évaluer avec objectivité ces variables, et ce, en présence des dépendances entre les RIFs dans le même système ce qui rend cette évaluation incertaine et incomplète. En outre, on constate qu'il n'est pas susceptible d'apprécier les différentes importances qualitatives par des simples valeurs ordinales (Tableau II.1 du chapitre II).

Aussi, le mode de calcul des poids à partir de préférences subjectives et l'obtention des valeurs de poids normalisées en utilisant une simple moyenne est source d'incertitude surtout

en présence de interactions et dépendances dans les RIFs. Par conséquent, en présence de ces incertitudes, la quantification des RIFs n'atteint pas sa crédibilité en termes de l'objectivité des résultats.

**- Incertitude liée à l'attribution des scores ( $Q_i$ )**

La procédure d'attribution des scores ( $Q_i$ ) est basée aussi au départ sur un jugement d'expert qualitatif, ceci est observé dans toutes les étapes d'attribution. Comme première sorte d'incertitude, l'échelle de notation des scores est à caractère ordinal et qualitatif ayant six niveaux (A-B-C-D-E-F) correspondants aux niveaux de conformité des RIFs (allant de bonne conformité à une mauvaise conformité) (voir tableau II.2. Chapitre II). En effet, l'expert peut facilement juger un RIF qui est de statut A comme étant de statut B. Ce type de jugement erroné est fréquent surtout quand il s'agit des statuts proches. Ces termes linguistiques définis sur des univers représentés par des lettres ne sont en réalité qu'une sorte d'imperfection des informations fournies par les experts eux même.

Par ailleurs, une autre source d'incertitude dans ce processus d'expertise est révélée dans la proposition des intervalles des probabilités [ $P_{inf}$   $P_{sup}$ ] incluant la probabilité de défaillance moyenne  $P_{moy}$  (voir section II.4.6. Chapitre II). À ce niveau, les intervalles proposés sont identifiés en fonction des valeurs des scores extrêmes (A et F) proposées dans le tableau II.3 du chapitre II. En effet, en plus de la rigidité de ces échelles d'intervalles, leur détermination est basée sur des échelles prédéfinies par les experts (0.5-2, 0.33-3, 0.2-5 et 0.1-10) et déterminée en fonction de ces statuts attribués aux RIFs, les valeurs des scores correspondantes ( $Q_i$ ,  $i=A, C, F$ ) sont déterminées selon les équations II.3 décrites dans le chapitre II. Cette procédure comporte une certaine ambiguïté dans la détermination des limites inférieure et supérieure des fréquences et des probabilités des événements de base.

De plus, une autre source d'incertitude, induite par l'interpolation linéaire appliquée dans la détermination des scores liés aux statuts B, D et E. En effet, les valeurs de  $Q_i$  pour  $St_i = B$ ,  $St_i = D$ ,  $St_i = E$  sont déduites moyennant une interpolation linéaire en utilisant l'échelle numérique suivante  $St_A = 1$ ,  $St_B = 2$ ,  $St_C = 3$ ,  $St_D = 4$ ,  $St_E = 5$ , and  $St_F = 6$  pour déterminer les scores  $Q_i(B)$ ,  $Q_i(D)$  et  $Q_i(E)$ . Deux remarques méritent d'être mises en exergue: la première concerne la rigidité de l'échelle des statuts allant de 1 à 6, issue de l'interpolation linéaire. La seconde est liée au système d'équation déterminé par les règles de l'interpolation linéaire.

A ceci s'ajoute l'affectation ferme des paramètres poids, scores, fréquences des événements initiateurs et probabilités des événements de base. Cette rigidité dans les échelles des poids et des scores utilisées peut être une autre source d'incertitude induisant aussi des erreurs en termes de prise de décision. En effet, la définition des échelles de notation relatives aux grandeurs des RIFs à savoir les poids et les scores pose également problème. Ceci se voit au niveau des échelles qui sont définies de manière franche en leur associant un classement numérique ordinaire. Ce qui ne s'accorde pas avec la nature incertaine et imprécise de

l'information sur les RIFs. Aussi, cette cotation néglige les effets de confusion entre catégories (chevauchement des intervalles) qui reflète la nature du raisonnement humain. Ceci dû à la discontinuité des échelles utilisées qui pose un problème d'interprétation et d'évaluation des résultats. Enfin, la représentation des jugements subjectifs par des valeurs linguistiques pondérées par des degrés de conformité des RIFs sur laquelle se base l'évaluation quantitative des RIFs reste incertaine.

#### **1.12.4 Problème liés à l'agrégation multicritère des RIFs**

L'agrégation multicritère est une opération d'une importance capitale dans n'importe quel processus décisionnel basé sur les jugements d'experts. En effet, elle constitue une étape cruciale dans le fonctionnement d'une méthode d'analyse multicritères d'aide à la décision [INERIS-DRA14, 2015]. Dans toutes les applications de BORA [Haugen et al., 2010; Vinnem et al., 2008; Duijm, 2008; Sklet et al., 2004; Youngjung et al., 2009], la somme pondérée est le seul opérateur d'agrégation utilisé pour calculer le facteur modifiant qui caractérise les facteurs d'influence de risques des événements initiateurs et de base.

Cependant le choix de cet opérateur, parmi d'autres opérateurs du type «moyenne pondérée» ne reflète pas souvent le plus fidèlement possible le phénomène étudié. Et ce, pour plusieurs raisons à savoir, son caractère compensatoire dans le cas de présence des RIFs ayant des scores dispersés, élevés et faibles et dans le cas de dépendance entre les RIFs qui est contre indiqué pour la somme pondérée. Nous essayerons dans le quatrième chapitre de mettre au point la somme pondérée en montrant ses avantages et inconvénients dans le cadre de BORA.

#### **1.13 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons essayé de présenter le cadre générale des travaux de cette thèse. Tout d'abord, nous avons essayé d'introduire quelques concepts et définitions liés à la gestion des risques et l'évaluation des performances des barrières de sécurité. Puis nous avons discuté la démarche générale de la gestion des risques ainsi que les méthodes d'analyse et d'évaluation des risques orientées barrières de sécurité. Dans ce contexte, une brève discussion des types incertitudes inhérentes aux méthodes d'évaluation des performances des barrières de sécurité est dressée. Un intérêt particulier est prêté à la méthode BORA, en discutant brièvement son principe, ses avantages et inconvénients. Relativement à cette méthode, nous avons essayé de soulever certains problèmes inhérents à cette méthode à savoir: l'absence d'une prise en compte de l'environnement opérationnel dans l'évaluation de l'importance des éléments constitutifs des barrières des barrières, les imperfections et incertitudes qu'ils l'entachent ainsi que les problèmes liés au jugement d'experts et à l'agrégation multicritère.

Nous signalons que cette thèse n'a pas vocation à traiter tous ces problèmes d'incertitudes. Nous nous limitons à traiter le problème de prise en compte de l'environnement opérationnel dans l'ordonnancement des éléments constitutifs et de criticité des barrières de sécurité et le problème d'agrégation multicritère des facteurs d'influence des risques (RIFs).

## **CHAPITRE II**

### **PRESENTATION DE L'APPROCHE BORA-CIA**

#### **«Barrier and Operational Risk Analysis - Criticality Importance Analysis»**

##### **II.1 Introduction**

Dans le précédent chapitre, nous avons présenté le cadre général dans lequel s'inscrit la démarche proposée BORA-CIA. Dans ce chapitre nous abordons en détail cette démarche en mettant en exergue son intérêt et en décrivant son principe ainsi que ses étapes. Cette démarche est une extension de l'approche BORA conventionnelle qui est dédiée à l'analyse des risques industriels et l'évaluation des performances des barrières de sécurité. En effet, elle s'étend à une analyse d'importance des éléments constitutifs des barrières de sécurité en tenant en compte de leur environnement opérationnel. Ainsi, elle contribue à estimer l'impact des facteurs opérationnels humains, techniques et organisationnels sur la criticité (importance) des composants des barrières de sécurité et leurs performances et ce, en termes de leurs probabilités de défaillance et par conséquent, sur les fréquences des scénarios d'accidents.

## **II.2 Contexte et objectifs de la démarche proposée**

La démarche BORA-CIA s'intègre dans cadre de l'analyse opérationnelle des risques industriels qu'est une exigence imposée par les normes et la réglementation. Il s'agit donc d'une démarche globale et adaptative dont l'objectif est d'améliorer en continu la sécurité des procédés industriels et de veiller à leur conformité. Plus particulièrement, elle met l'accent sur la maîtrise des risques inhérents à l'entreprise en considérant les performances des barrières de sécurité dans leur contexte réel et opérationnel en termes de fiabilité et d'intégrité.

BORA-CIA est développée à travers l'incorporation de l'analyse d'importance de criticité dans la méthode BORA conventionnelle pour servir comme outil optimal d'aide à la décision et à l'optimisation de la stratégie de maintenance et d'inspection des barrières de sécurité relative aux risques inhérents aux procédés industriels [Bourareche et al., 2020]. Elle implique plusieurs méthodes d'analyse qualitative et quantitative des risques avec valorisation du retour d'expérience et des données issues de jugement d'experts. Dans ce contexte, l'analyse opérationnelle des risques signifie la prise en compte du contexte opérationnel (ou réel) des procédés industriels en intégrant dans l'analyse des facteurs opérationnels d'ordre technique (conditions et contraintes d'exploitation du système et de son environnement), humains (intervention, maintenance et procédures et moyens de supervision) et organisationnels (gestion et organisation des opérations, des procédures,...etc.).

L'analyse de criticité associée à BORA conventionnelle permet une prise en compte des performances des barrières de sécurité en termes d'optimisation de maintenance et d'inspection, en exploitant l'ordre de priorité des éléments constitutifs de ces barrières. En effet, la variabilité de la performance de ces éléments en termes de fiabilité et de disponibilité dans un contexte réel, constitue une source d'incertitudes potentielle dont il ne faut pas négliger dans l'évaluation des risques et dans la prise de décision.

En conclusion, BORA-CIA a pour objectif:

- De proposer une BORA améliorée basée sur l'analyse d'importance des éléments constitutifs des barrières de sécurité;
- D'optimiser les stratégies de maintenance et d'inspection de ces barrières;
- De maîtriser efficacement dans des temps optimaux les défaillances et les risques liés aux procédés.

## **II.3 Description de la démarche proposée**

La démarche proposée s'articule autour de deux principales parties : la première partie concerne BORA conventionnelle, la seconde est une extension de la première et comporte une analyse d'importance de criticité (CIA: Criticality Importance Analysis) développée en fonction des objectifs précédemment définis [Bourareche et al., 2020]. La figure II.1 décrit la

démarche globale de BORA-CIA. Cette démarche est composée de quatre principales étapes qui sont détaillées dans ce qui suit. La mise en œuvre de la démarche fera l'objet du troisième chapitre.

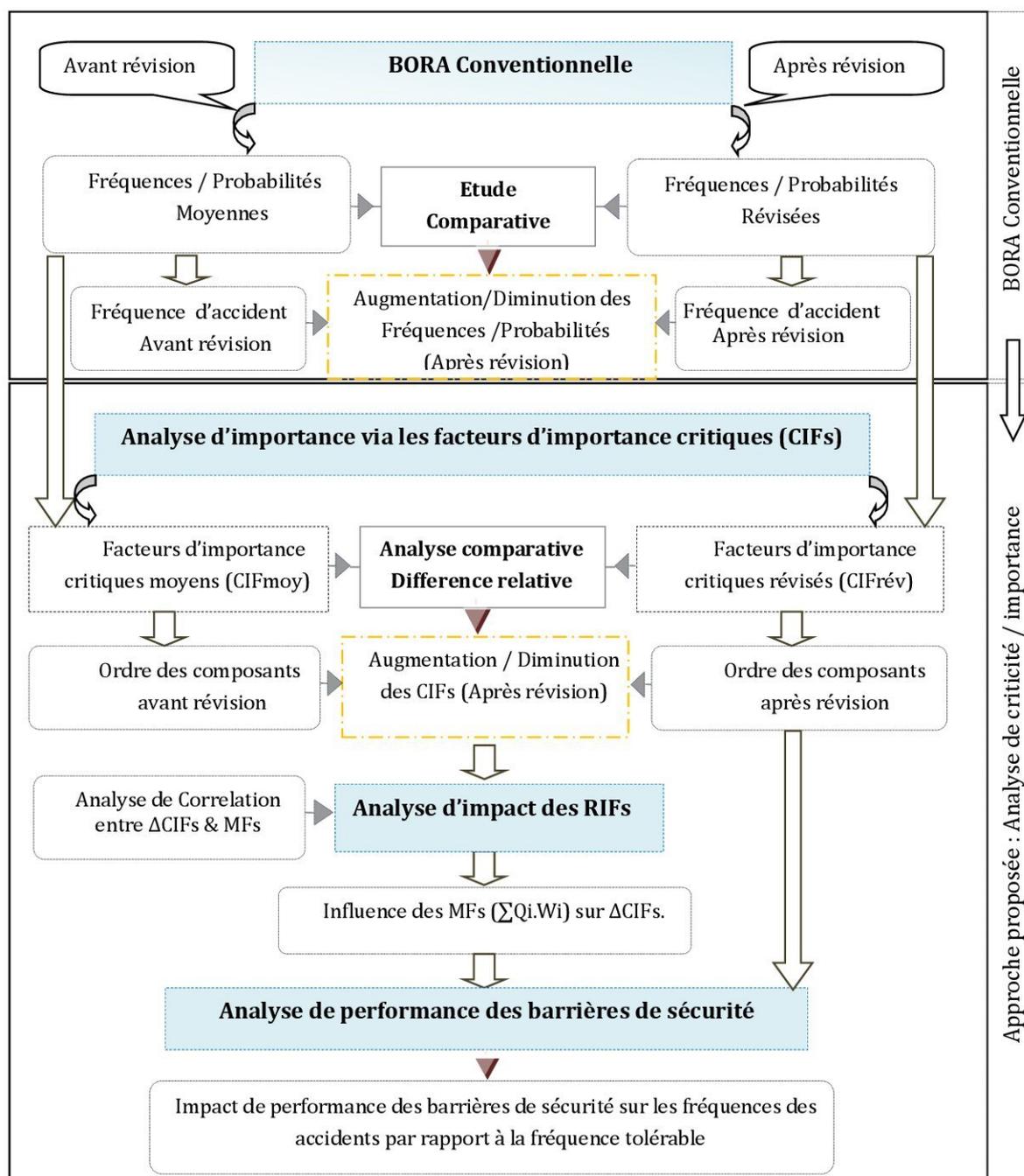


Figure II.1. Démarche globale de BORA-CIA [Bourareche et al., 2020]

## II.4 Partie 1: BORA conventionnelle

La méthode BORA comporte cinq principales étapes. Les modèles de base utilisés par la méthode BORA sont : la méthode de diagramme bloc barrières (DBB), la méthode de l'arbre de défaillances (Add) et la méthode de diagramme de fluence de risque. Ces modèles sont

utilisés pour analyser en détails les interactions entre les accidents, les barrières de sécurité et les facteurs opérationnels de l'environnement industriel [Innem et al., 2008; Rausand, 2011; Haugen et al., 2010; Duijm, 2008; Sklet et al., 2004; Youngjung et al., 2009].

A travers la figure II.1, on peut constater que les résultats de BORA conventionnelle vont servir comme données d'entrée pour BORA-CIA. Ces résultats vont être capitalisés et valorisés davantage pour une maîtrise optimale des risques [Bourareche et al., 2020].

## II.4.1 Identification des scénarios d'accident

### II.4.1.1 Élaboration des diagrammes blocs barrières

Les diagrammes blocs barrières sont employés pour visualiser les scénarios d'accident et les différentes barrières de sécurité existantes qui font face à l'occurrence des différentes séquences d'événements. Comme le montre la figure II.2, le modèle consiste à décrire les différentes séquences accidentelles en partant d'un événement initiateur et en arrivant aux conséquences.

L'évolution de chaque séquence vers une conséquence indésirable est fonction de la performance des barrières de sécurité. Ce modèle semi-quantitative obéit aux règles de calcul du modèle d'arbre d'événements (AdE).

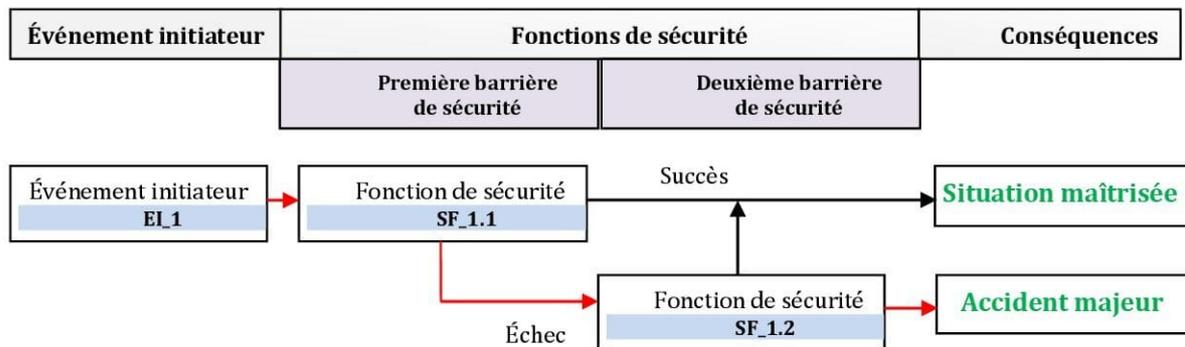


Figure II.2 Diagramme bloc barrières

### II.4.1.2 Développement des arbres de défaillances des fonctions de sécurité

Cette méthode consiste à représenter graphiquement les combinaisons possibles d'événements conduisant à la défaillance de la barrière de sécurité. Une telle modélisation met donc en évidence les relations de cause à effet entre les différentes fonctions de sécurité et permettra la quantification des performances des barrières de sécurité avant et après révision des probabilités des EdBs. La figure II.3 montre un schéma global des modèles graphiques utilisés dans la méthode BORA.

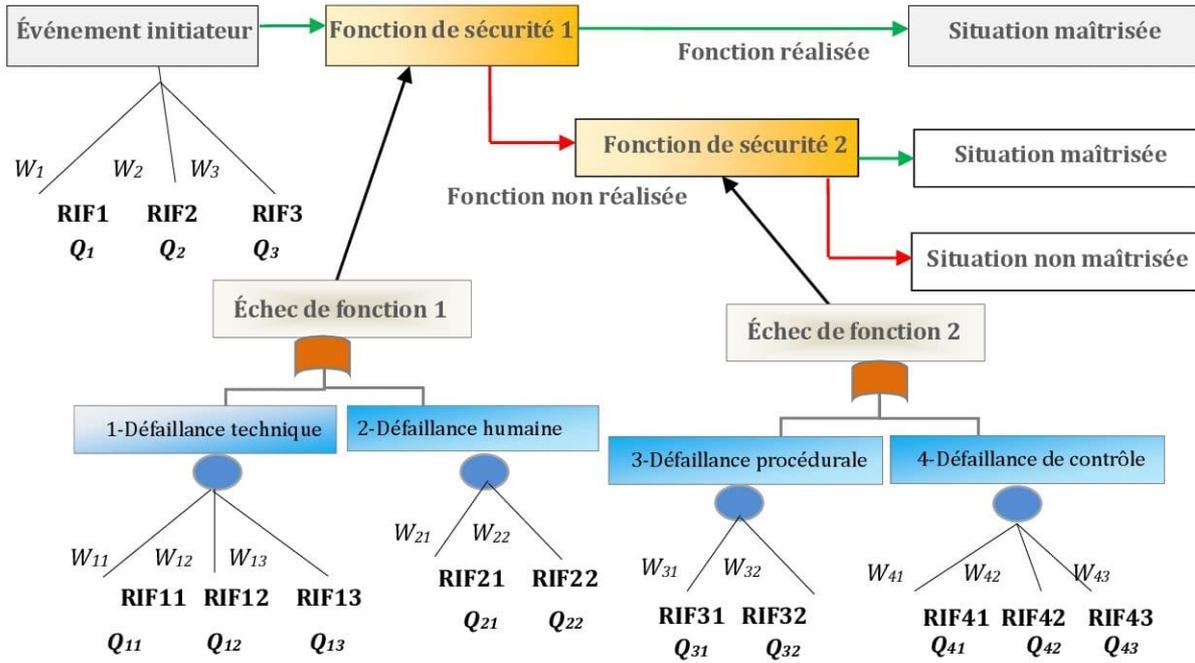


Figure II.3 Modèles de base utilisés par la méthode BORA [Bourareche et al., 2020]

#### II.4.2 Attribution des fréquences et des probabilités moyennes

Après avoir identifié les scénarios d'accidents selon le schéma de la figure II.3, nous procédons à l'estimation des fréquences des événements initiateurs et des probabilités des événements de base relatifs aux barrières de sécurité. Il est important de bien préciser à ce niveau, que les fréquences et les probabilités moyennes attribuées sont établies à partir d'informations spécifiques sur le processus, de données du retour d'expérience et des bases de données génériques externes ou propres à l'entreprise. Les probabilités moyennes des EdBs vont servir pour la détermination de la performance des barrières de sécurité en termes de probabilités de défaillance à la demande (PFD).

#### II.4.3 Calcul des fréquences moyennes des scénarios d'accidents

Dans cette partie on considère uniquement les valeurs moyennes non révisées relatives aux événements initiateurs et aux défaillances des barrières de sécurité pour calculer les fréquences moyennes des accidents. En considérant par exemple le modèle de la figure II.2, l'accident est le résultat de l'occurrence de l'événement initiateur suivi de l'échec des fonctions de sécurité SF\_1.1 et SF\_1.2. Sa fréquence moyenne est donnée donc par:

$$F_{moy(Accident)} = f_{moy(EI_1)} \cdot p_{moy(SF_1)} \cdot p_{moy(SF_2)} \quad (II.1)$$

Où:  $f_{moy(EI_1)}$  est la fréquence moyenne de l'événement initiateur,  $p_{moy(BS_i)}$  ( $i=1, 2$ ) est la PFD moyenne de la fonction de sécurité  $SF_i$ .

#### II.4.4 Identification des facteurs d'influence des risques (RIFs)

Plusieurs facteurs peuvent influencer sur l'occurrence de l'événement initiateur, des défaillances des barrières de sécurité voire l'accident majeur. Ces facteurs peuvent être humains, opérationnels, organisationnels et techniques spécifiques au système industriel.

L'identification de ces facteurs est une étape clé dans la méthode BORA et doit être attentivement réalisée selon les spécificités de l'industrie étudiée. En effet, l'occurrence des événements initiateurs et des EdBs relatifs aux défaillances des barrières de sécurité varie en fonction des facteurs de risques liés au contexte opérationnel des activités industrielles. Ces facteurs sont notés RIFs (Risk Influencing Factors). Le modèle permettant de les identifier est le diagramme de fluence de risque [Aven et al., 2006a; Haugen et al., 2010].

Un exemple de diagramme de fluence de risque pour l'événement "Défaillance d'une soupape de sécurité " est représenté sur la figure II.4.

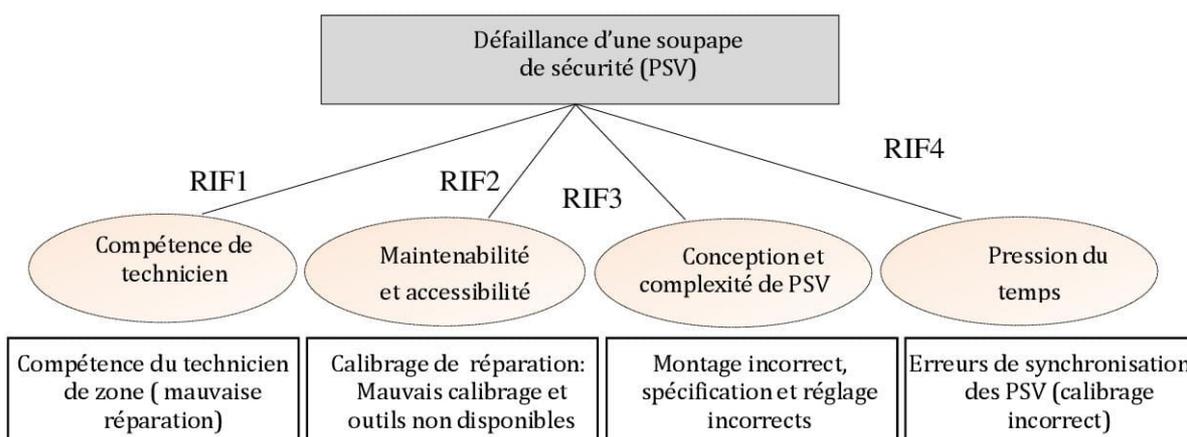


Figure II.4: Exemple de diagramme de fluence de risque.

Relativement à cette étape, nous présentons en annexe A un tableau récapitulatif des familles des RIFs génériques, lequel nous a servi de guide pour identifier les différents RIFs dans notre étude de cas. À titre d'illustration, la figure II.5 montre les facteurs de risque fréquemment rencontrés dans les systèmes industriels. À noter que cette étape est pluridisciplinaire, nécessitant une collaboration de tous les services concernés à savoir, l'exploitation, la maintenance, la sécurité, l'instrumentation, la formation, et l'administration. À noter aussi que l'expertise est une source potentielle pour l'identification des RIFs.

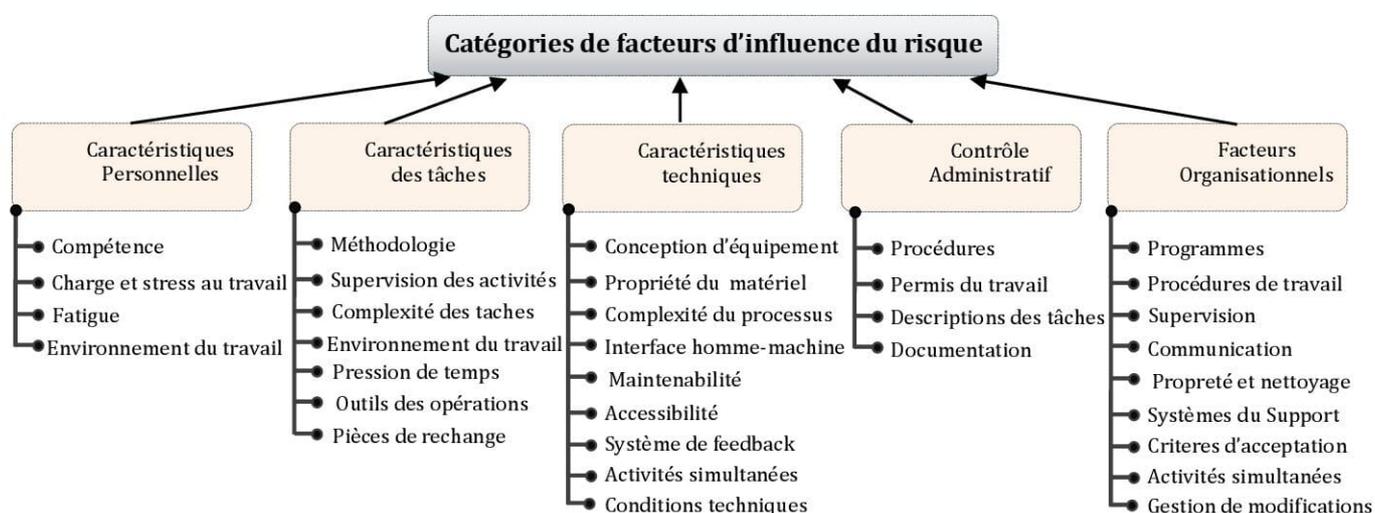


Figure II.5: Aspects de facteurs d'influence du risque [Haugen et al., 2010].

## II.4.5 Attribution des poids et des scores aux RIFs

Après avoir identifié les RIFs relatifs aux événements initiateurs et aux EdBs, une quantification des RIFs doit être effectuée en attribuant à chacun d'eux un "Poids" et un "Score". Cette attribution est basée principalement sur des jugements d'experts. Le poids ( $W_i$ ) nous renseigne sur l'ampleur de l'influence du  $i^{\text{ème}}$  RIF sur l'occurrence de l'événement tandis que le score ( $Q_i$ ) nous renseigne sur l'état ou niveau de conformité de ce RIF par rapport aux normes et spécifiques [Haugen et al., 2010]. L'ensemble des couples ( $Q_i, W_i$ ) permet de déterminer une mesure de modification des probabilités ou des fréquences moyennes des événements, laquelle est appelée « facteur modifiant ».

### II.4.5.1 Attribution des poids ( $W_i$ ) aux facteurs d'influence

Cette étape consiste à évaluer l'effet des RIFs sur l'occurrence des événements initiateurs et de base. Pour ce faire, une échelle ordinaire à cinq niveaux (10 - 8 - 6 - 4 - 2) est proposée dans [Haugen et al., 2010]. Ces niveaux correspondent respectivement au degré l'importance de chaque RIF (de forte importance à faible importance) dans sa contribution à l'occurrence de l'événement (défaillance de la barrière de sécurité).

Le tableau II.1 montre la procédure d'attribution des poids qui est basée principalement sur les avis des experts qui jugent l'ampleur de l'effet de chaque RIF indépendamment des autres. Notons que les poids des RIFs influençant le même événement de base doivent être normalisés et leur somme doit être égal à la valeur un (1) comme le montré l'équation (II. 2).

$$\sum_{i=1}^n W_i = 1 \quad (\text{II. 2})$$

Nous donnons un exemple d'attribution des poids ( $W_i$ ) aux facteurs d'influence définis dans le cas de la barrière de sécurité présenté sur la figure II.4:

Tableau II.1. Attribution des poids ( $W_i$ ) aux facteurs d'influence

RIF	Importance (Poids)					Poids normalisé
	Elevé (10)	(8)	(6)	(4)	Faible (2)	
RIF1					X	0.0909
RIF2	X					0.454
RIF3				X		0.1818
RIF4			X			0.2727
<b>Poids</b>	10	0	6	4	2	1.00
<b>Somme</b>	22					

### II.4.5.2 Attribution des scores ( $Q_i$ ) aux facteurs d'influence

Cette étape consiste à évaluer la conformité des facteurs de risque par rapport aux normes et standards appliqués. Pour ce faire, une échelle ordinaire qualitative à six statuts est proposée par Haugen et al [Haugen et al, 2010]. Comme montré dans le tableau II.2, ces

statuts correspondent respectivement au niveau de conformité du RIF (allant de bonne conformité à une mauvaise conformité).

Tableau II.2. Schéma générique de notation des RIFs [Haugen et al, 2010].

Statut (Si)	Description du niveau de sécurité
A	Statut correspondant à la meilleure pratique de normes exigées
B	Statut correspondant à la pratique presque meilleure de normes exigées
C	Statut correspondant à la moyenne pratique de normes exigées
D	Statut correspondant à la pratique de normes exigées inférieure à la moyenne
E	Statut correspondant à la pratique de normes exigées très inférieure à la moyenne
F	Statut correspondant à la pire pratique de normes exigées

La procédure d'attribution des scores est principalement basée sur les avis des experts qui jugent le niveau de conformité de chaque RIF indépendamment des autres. Ci-après, nous détaillons cette procédure [Haugen et al, 2010]:

- L'expert est invité à attribuer un statut de conformité à chaque RIF identifié et ce, selon l'échelle de notation développée par les experts eux-mêmes et qui peut être similaire à celle proposée (voir le tableau II.2) et spécifique à l'industrie étudiée.
- L'expert propose un intervalle de confiance de probabilité de défaillance pour l'événement  $[P_{inf}, P_{sup}]$  incluant la probabilité de défaillance moyenne  $P_{moy}$ . Cet intervalle de confiance peut être calculé comme suit:
  - Déterminer la borne inférieure  $P_{inf}(e)$  comme la limite inférieure pour  $P_{rév}$  selon le jugement expert.
  - Déterminer  $P_{sup}(e)$  comme la borne supérieure pour  $P_{rév}(e)$  selon le jugement expert.
  - Ensuite, en fonction de statuts attribués aux RIFs, les valeurs correspondantes des scores ( $Q_i, i=A, C, F$ ) sont déterminées selon les équations suivantes:

$$Q_i = \begin{cases} P_{inf}/P_{moy} & \text{if } St_i = A \\ 1 & \text{if } St_i = C \\ P_{sup}/P_{moy} & \text{if } St_i = F \end{cases} \quad (\text{II. 3})$$

- Par conséquent, les valeurs de  $Q_i$  pour  $St_i = B, St_i = D, St_i = E$  sont déduites moyennant une interpolation linéaire en utilisant l'échelle numérique suivante:  $St_A = 1, St_B = 2, St_C = 3, St_D = 4, St_E = 5$ , and  $St_F = 6$ . On obtient les équations suivantes:

$$Q_i(B) = \frac{p_{inf}}{p_{moy}} + \frac{(St_B - St_A) \cdot (1 - \frac{p_{inf}}{p_{moy}})}{St_C - St_A} \quad (\text{II. 4})$$

$$Q_i(D) = 1 + \frac{(St_D - St_C) \cdot \left(\frac{p_{sup}}{p_{moy}} - 1\right)}{St_F - St_C} \quad (II.5)$$

$$Q_i(E) = 1 + \frac{(St_E - St_C) \cdot \left(\frac{p_{sup}}{p_{moy}} - 1\right)}{St_F - St_C} \quad (II.6)$$

Le tableau II.3 montre quelques échelles d'intervalles proposées dans [Haugen et al, 2010].

Tableau II.3. Échelles d'intervalles proposées [Haugen et al, 2010].

Status \ Cas	Cas 1 (0.5-2)	Cas 2 (0.33-3)	Cas 3 (0.2-5)	Cas 4 (0.1-10)
A	0.50	0.33	0.2	0.1
B	0.75	0.67	0.6	0.55
C	1	1	1	1
D	1.33	1.67	2.33	4
E	1.67	2.33	3.67	7
F	2	3	5	10

- **Calcul du facteur modifiant MF**

Le MF est donnée par la moyenne pondérée des  $Q_i$ , i.e. C'est la combinaison linéaire des couples  $(Q_i, W_i)$  en considérant  $n$  RIFs associés à un événement  $e$  donné:

$$MF_e = \sum_{i=1}^n Q_i \cdot W_i \quad (II.7)$$

#### II.4.6 Détermination des fréquences et des probabilités révisées

En tenant compte des scores et des poids des RIFs identifiés, la probabilité révisée d'un événement  $e$  ( $P_{rév}(e)$ ) est calculée comme suit :

$$P_{rév}(e) = P_{moy}(e) \cdot MF_e \quad (II.8)$$

Où,  $MF_e$  est le facteur modifiant donné par l'équation (II.7) et  $P_{moy}(e)$  la probabilité moyenne de  $e$  avant révision.

En considérant la combinaison linéaire des  $(Q_i, W_i)$ , l'équation de la probabilité révisée d'un événement  $e$  ( $P_{rév}(e)$ ) est donnée par l'équation suivante:

$$P_{rév}(e) = P_{moy}(e) \cdot \sum_{i=1}^n Q_i \cdot W_i \quad (II.9)$$

#### II.4.7 Détermination des fréquences révisées des scénarios d'accident

Dans cette étape, les fréquences révisées des scénarios d'accidents sont calculées en remplaçant les valeurs moyennes non révisées par celles qui sont révisées et ce, pour les fréquences des événements initiateurs et les PFD des barrières de sécurité. Dans ce cas, l'équation (II.1) appliquée aux valeurs révisées devient:

$$F_{rév}(Accident) = f_{rév}(EI_1) \cdot P_{rév}(SF_1) \cdot P_{rév}(SF_2) \quad (II.10)$$

Notons que la fréquence moyenne d'un scénario d'accident peut diminuer, augmenter ou rester constante en fonction de la variation de fréquence de l'événement initiateur et des probabilités de défaillance moyennes des fonctions de sécurité. Rappelons que dans cette étape, la variation des fréquences et des probabilités est due au facteur modifiant des RIFs calculé moyennant l'équation (II.7).

#### II.4.8 Évaluation des scénarios d'accidents avant et après la révision

La dernière étape de BORA concerne l'évaluation des scénarios d'accidents par rapport aux critères de risque de référence. Deux sortes d'évaluations sont à considérer : une évaluation avant révision et une autre après révision. La première consiste à évaluer la fréquence de l'accident en considérant les valeurs moyennes des fréquences et des PFD des barrières de sécurité, alors que la seconde concerne la fréquence de l'accident calculée à partir des valeurs révisées.

Bien que la méthode BORA soit une méthode hybride d'analyse des risques, elle n'aborde pas tous les aspects du management du risque. Plus particulièrement, les aspects pratiques de la maîtrise des risques en termes de maintenance et d'inspection méritent d'être développés.

Ce constat met en évidence l'importance de l'intégration de l'analyse d'importance de criticité des événements de base comme principales causes des défaillances des barrières de sécurité et par suite, une gestion optimale des opérations de maintenance et d'inspection en termes de coût et de temps.

#### II.5 Partie 2: Analyse d'importance de criticité (Criticality Importance Analysis-CIA)

L'application d'une mesure d'importance dépend de la phase du cycle de vie du système [Rausand et al, 2004, Pages et Gondran, 1980]. Dans la phase de conception du système, cette mesure peut être utilisée pour identifier les points faibles de ce système et les éléments qui devraient être améliorés ou changés pour augmenter sa fiabilité et/ou sa disponibilité. La fiabilité d'un composant, par exemple, peut être améliorée par le choix d'un composant de haute fiabilité ou en considérant un sous-système redondant. Dans la phase d'exploitation, la mesure d'importance peut être utilisée pour améliorer l'allocation des ressources d'inspection et de maintenance aux éléments du système les plus importants. Entre autres, on doit être en mesure de répondre à cette question : sachant que le système est défaillant, quel élément faut-il réparer ou remplacer en priorité? L'analyse d'importance dans cette phase peut être aussi utilisée pour objectif d'agir sur les contraintes opérationnelles et environnementales des éléments les plus critiques, ce qui représente un intérêt particulier pour BORA-CIA. On serait donc en mesure de répondre aussi à cette question: sur quels facteurs de risque doit-on agir pour améliorer de façon efficace et moins coûteuse la performance des barrières de sécurité ?

Les mesures d'importance sont usuellement utilisées dans l'analyse quantitative du risque, notamment dans les systèmes à haut risque tels que les systèmes nucléaires et pétrochimiques [Rausand et al, 2004; Dutuit et Rauzy, 2014]. Dans ce type d'applications, les mesures d'importance des composants sont appelées les mesures d'importance du risque ou les mesures de signification du risque (ou de sécurité) et sont essentiellement utilisées pour identifier les composants et les sous-systèmes qui devraient être améliorés pour réduire le risque inhérent au système et pour optimiser les opérations d'inspection et du test.

La seconde partie de l'approche BORA-CIA proposée a pour objectif principal de mener une analyse d'importance de criticité des EdBs des arbres de défaillances relatifs aux barrières de sécurité en tenant compte de leur environnement opérationnel. L'identification des éléments critiques, que ce soient des composants, des activités humaines, des opérations d'organisation ou autres, est utilisée pour améliorer les performances des barrières de sécurité et par conséquent, réduire le risque exprimé en termes de fréquences d'accidents. Comme montre la figure II.1, les résultats de BORA conventionnelle serviront comme données initiales à l'analyse d'importance.

Dans le cadre d'une analyse d'importance, deux catégories de facteurs d'importance sont proposées : les facteurs d'importance structurels (En anglais, structural importance factors) et les facteurs d'importance probabilistes (En anglais, probabilistic importance factors).

Les facteurs d'importance structurels donnent l'importance relative d'un composant par rapport à sa position dans la structure du système et peuvent être utilisés même si la loi de durée de vie du composant n'est pas connue. Ces facteurs ne permettent pas de distinguer les composants qui ont des comportements fiabilistes différents mais se situant à des positions similaires dans la structure du système. Les facteurs d'importance probabilistes évaluent l'importance relative d'un composant en prenant en compte de façon conjointe ses contributions structurelle et probabiliste à la fiabilité et/ou à la disponibilité du système. Dans l'approche BORA-CIA, notre choix est porté sur le facteur d'importance critique (En anglais, Critical Importance Factor, CIF) proposé par Lambert [Lambert, 1979], qui fait partie des facteurs probabilistes.

### II.5.1 Détermination du facteur d'importance critique des EdBs

a) Le facteur d'importance critique CIF est une extension du facteur d'importance marginal de Birnbaum [Birnbaum, 1969] avec l'avantage de tenir compte de l'ordre de grandeur des probabilités des différents EdBs.

En considérant l'AdD comme modèle de dysfonctionnement et en associant aux EdBs des probabilités indépendantes du temps (en considérant, par exemple, des valeurs moyennes sur un intervalle du test), le facteur d'importance marginal d'un EdB  $e$ , noté  $IB(e)$ , est défini par:

$$IB(e) = \frac{\partial P(S)}{\partial p(e)} \quad (\text{II. 11})$$

Où  $P(S) = f(p)$  étant la fonction-probabilité de l'événement sommet, représentant généralement l'indisponibilité moyenne du système,  $p(e)$  étant la probabilité moyenne de l'EdB  $e$ . Dans le cadre d'une analyse de sécurité, l'EdB  $e$  peut être une défaillance d'un composant, une erreur humaine ou une dégradation de l'environnement. Pour la défaillance d'un composant,  $p(e)$  représente l'indisponibilité moyenne de ce composant.

Pour des Add cohérents associés à des fonctions de structure monotones, la probabilité (i.e. l'indisponibilité)  $P(S)$  peut être exprimée comme une fonction linéaire de  $p(e)$  en utilisant la décomposition de Shannon, soit :

$$\begin{aligned} P(S) &= p(e).P(S|e) + (1 - p(e)).P(S|\bar{e}) \\ &= p(e).[P(S|e) - P(S|\bar{e})] + P(S|\bar{e}) \end{aligned} \quad (\text{II.12})$$

Où  $P(S|e) = P_s(1_e, p)$  et  $P(S|\bar{e}) = P_s(0_e, p)$ , représentant respectivement les probabilités de  $S$  en considérant l'occurrence (certaine) et la non-occurrence de l'EdB  $e$ . Les EdB de l'Add étant supposés indépendants.

En tenant compte de (II.12), l'équation (II.11) devient :

$$IB(e) = P(S|e) - P(S|\bar{e}) \quad (\text{II.13})$$

**b)** Par définition, le facteur d'importance critique d'un composant  $c$ , noté  $CIF(c/t)$ , correspond à la probabilité que le composant  $c$  ait provoqué la défaillance du système, sachant que le système est défaillant à l'instant  $t$ . Pour que le composant  $c$  entraîne la défaillance du système, il doit être critique. Rappelons que pour que le composant  $c$  soit critique pour le système, il faut que le système fonctionne si et seulement si le composant  $c$  fonctionne quelque soit les états des autres composants du système. Par conséquent, si le composant  $c$  est réparé après défaillance, le système se rétablit une seconde fois. Pour cette raison, le CIF peut être utilisé dans la hiérarchisation des actions de maintenance dans les systèmes complexes [Rausand et al, 2004].

En considérant toujours le modèle Add avec des probabilités moyennes, le CIF d'un EdB, noté  $CIF(e)$ , est défini par :

$$CIF(e) = \frac{IB(e).p(e)}{P(S)} \quad (\text{II.14})$$

Où  $IB(e)$  est donné par l'équation (II.12).

Dans notre démarche, deux types de facteurs d'importance critiques sont calculés:

- Un facteur d'importance moyen " $CIF_{moy}$ " qui est calculé en considérant les probabilités moyennes avant révision, soit :

$$CIF_{moy}(e) = \frac{[P_{moy}(S|e) - P_{moy}(S|\bar{e})].p_{moy}(e)}{P_{moy}(S)} \quad (\text{II.15})$$

- Un facteur d'importance révisé " $CIF_{rév}$ " qui est calculé en considérant les probabilités révisées, soit:

$$CIF_{rév}(e) = \frac{[P_{rév}(S/e) - P_{rév}(S/\bar{e})] \cdot p_{rév}(e)}{P_{rév}(S)} \quad (II.16)$$

À l'issue de cette étape d'analyse, on pourrait constater que l'importance d'un EdB (généralement une défaillance d'un composant) ne dépend pas seulement de sa probabilité de défaillance moyenne qui peut être non représentative dans un contexte réel, mais aussi de son environnement opérationnel (facteurs humains, techniques et organisationnels), d'où l'intérêt de l'équation (II.16) qui permet d'estimer la criticité réelle des EdBs relativement à la performance réelle des barrières de sécurité (exprimée en terme d'indisponibilité).

### II.5.2 Analyse comparative via la variation des facteurs d'importance critiques

Cette étape consiste à étudier la variation des CIF des EdB avant et après révision de leurs probabilités moyennes. Pour ce, on se propose de calculer le taux de variation  $\Delta CIF(e)$  qui exprime la variation relative des CIF avant et après révision. Ce taux est calculé comme suit :

$$\Delta CIF(e) = \frac{CIF_{rév}(e) - CIF_{moy}(e)}{CIF_{moy}(e)} \quad (II.17)$$

En fonction du signe de l'expression (II.16), les trois cas suivants peuvent avoir lieu:

- $\Delta CIF(e) > 0$  si  $CIF_{rév}(e) > CIF_{moy}(e)$  ; l'EdB est plus critique après révision.
- $\Delta CIF(e) < 0$  si  $CIF_{rév}(e) < CIF_{moy}(e)$  ; l'EdB est moins critique après révision.
- $\Delta CIF(e) = 0$  si  $CIF_{rév}(e) = CIF_{moy}(e)$  ; la criticité de l'EdB reste la même après révision.

### II.5.3 Classement des événements de base en fonction de leurs CIFrév

Sur la base de l'étude de variation des  $\Delta CIF$  relatifs aux différents EdBs, on procède un réordonnancement de ces EdBs. En supposant que les poids des RIFs restent inchangés pour tous les EdBs, l'ordre d'importance de ces derniers après révision dépendra de l'état des RIFs par rapport au niveau de conformité aux normes et à la réglementation (i.e. les scores  $Q_i$ ), comme le montre le tableau II.4. En effet, la criticité d'un EdB par rapport aux autres événements peut augmenter (resp. diminuer) si ses RIFs tendent vers une conformité insuffisante (resp. adéquate).

Tableau II.4 : Variation de la criticité en fonction des niveaux de conformité

Variation des CIF ( $\Delta CIF$ )					
$\Delta CIF < 0$ : EdB moins critique après révision		$\Delta CIF = 0$ : Criticité inchangée	$\Delta CIF > 0$ : EdB plus critique après révision		
↓	↓	↓↓	↓	↓	↓
<b>Statut A</b>	<b>Statut B</b>	<b>Statut C</b>	<b>Statut D</b>	<b>Statut E</b>	<b>Statut F</b>
<b>Conformité Parfaite</b>	<b>Conformité Bonne</b>	<b>Conformité Moyenne</b>	<b>Conformité Insuffisante</b>	<b>Conformité mauvaise</b>	<b>Conformité Très mauvaise</b>

## II.5.4 Evaluation de l'impact des RIFs

Cette étape a pour but d'évaluer l'impact des RIFs sur la performance des barrières de sécurité et donc, sur les fréquences des scénarios d'accidents. En fait, les RIFs peuvent agir sur quatre niveaux : *i*) au niveau de la fréquence des événements initiateur qui sera le premier niveau d'influence, *ii*) au niveau des probabilités des EdBs qu'on peut qualifier de niveau local, *iii*) au niveau de la performance des barrières de sécurité qui constitue le niveau intermédiaire dans la séquence d'un scénario d'accident et, *iv*) au niveau global qui est celui de la fréquence des scénarios d'accidents (i.e., conséquences indésirables). La figure II.6 illustre ces quatre niveaux d'influence des RIFs.

La propagation de l'impact des RIFs à travers ces niveaux ne semble pas être évidente étant donné le nombre des RIFs à considérer pour chaque modèle de dysfonctionnement d'une barrière de sécurité, i.e. AdD, et le nombre de barrière en cascade à analyser.

À noter aussi qu'une étude théorique de l'impact de la criticité réelle des EdBs par dérivation partielle de la fréquence du scénario par rapport aux différents RIFs est une opération fastidieuse et il serait pratique de tirer directement des conclusions à partir des études de cas sur des systèmes opérationnels.

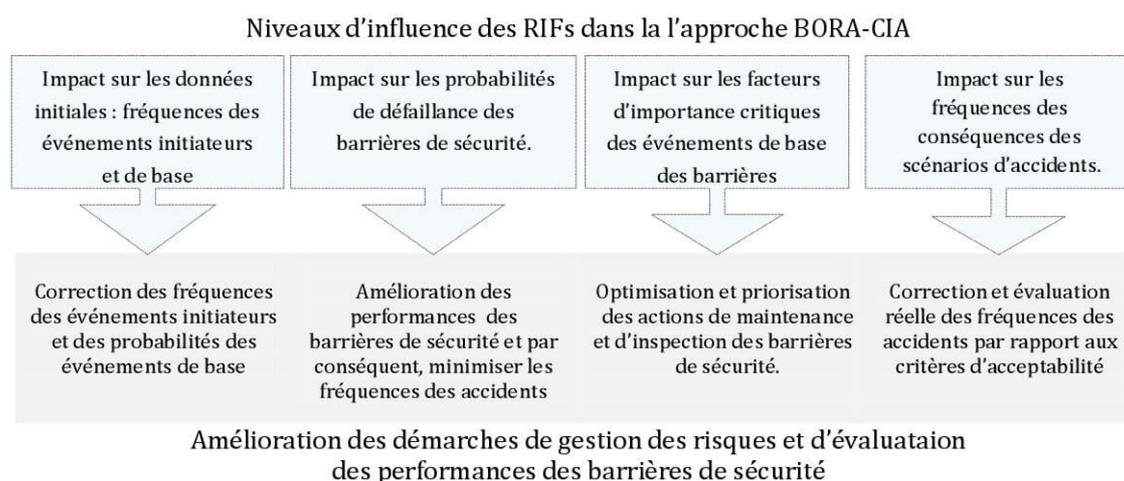


Figure II.6: Niveaux d'influence des RIFs

### II.5.4.1 Analyse de l'impact des RIFs sur la criticité des EdBs

À ce niveau, une évaluation de l'impact des RIFs sur la variation des CIFs relatifs aux EdBs est effectuée afin de déterminer le degré de dépendance entre la criticité des EdBs et les RIFs qui leur sont associés. À cette fin, une analyse de corrélation est effectuée en utilisant le coefficient de corrélation de Pearson. Ce dernier permet de mesurer le degré de dépendance linéaire entre deux variables [Cohen et al., 2003; Zio, 2007] (choisir une seule référence de nature purement statistique). En notant ces deux variables  $x$  et  $y$ , le coefficient de corrélation, noté  $r$ , est donné par:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}} \quad (II.18)$$

Ce coefficient varie entre -1 et +1. Son interprétation est la suivante:

- Si les deux variables  $x$  et  $y$  varient indépendamment l'une de l'autre, la valeur de  $r$  est 0.
- Si les deux variables évoluent parallèlement ( $y$  augmente lorsque  $x$  augmente), sa valeur sera positive, avec un maximum de +1.
- Si les deux variables évoluent à l'inverse l'une de l'autre, sa valeur sera négative, avec un minimum de -1.

Dans notre cas,  $x=MF$  et  $y=\Delta CIF$ ,  $\bar{x}$  et  $\bar{y}$  représentent respectivement les valeurs moyennes de  $x_i = MF(e_i)$  et  $y_i = \Delta CIF(e_i)$  et  $N$  est le nombre d'EdB liés à la défaillance de la fonction de sécurité. La figure II.7 schématise l'échelle les différents degrés d'impact allant d'une très forte influence avec  $r=-1$  et  $r=+1$  à une influence faible voire même nulle avec  $r = 0$  (absence de dépendance).

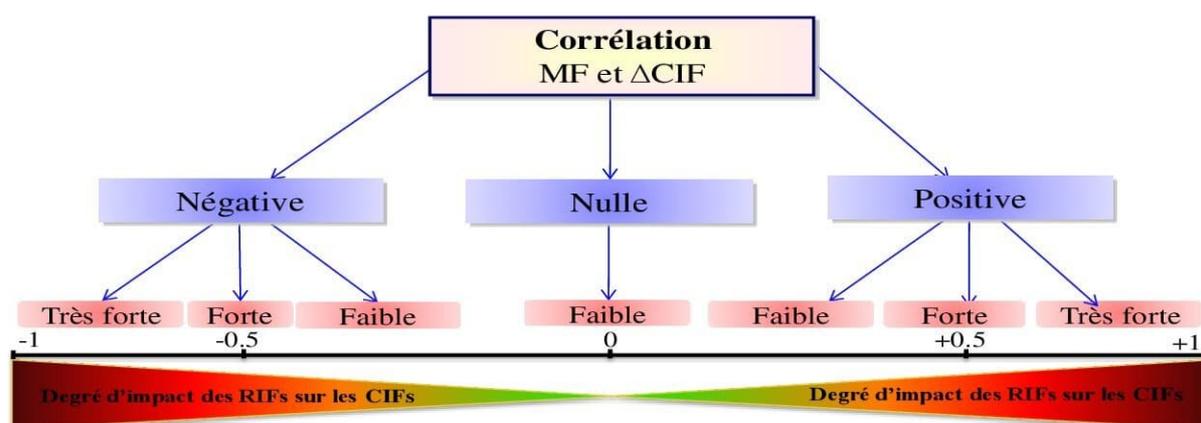


Figure II.7: Echelle de dépendance entre  $MF$  et  $\Delta CIF$ .

#### II.5.4.2 Impact des RIFs sur la performance des barrières de sécurité

L'impact des RIFs sur l'indisponibilité des barrières de sécurité (i.e. PFD) peut se traduire soit par une augmentation de cette indisponibilité et dans ce cas, on parle d'un effet négatif des RIFs dû des mauvaises pratiques en matière de gestion de sécurité, soit par une diminution de cette indisponibilité par effet positif des RIFs (meilleures pratiques).

#### II.5.4.3 Impact des RIFs sur les fréquences des scénarios d'accidents

L'impact des RIFs sur les fréquences des scénarios d'accidents peut être essentiellement évalué par rapport aux critères d'acceptabilité du risque imposés ou prédéfinis dans les premiers temps de l'application de BORA-CIA. À noter qu'à l'instar des PFDs des barrières de sécurité, les fréquences des scénarios peuvent soit croître par effet négatif des RIFs, soit décroître par leur effet positif. L'augmentation ou la diminution de cette fréquence pour des modèles cohérents n'est évidente que si l'on a une variation de tous les RIFs dans un sens ou dans un autre, ce qui n'est pas souvent le cas.

#### II.5.5 Analyse et amélioration de la performance des barrières de sécurité

L'analyse de performance des barrières de sécurité est une étape importante qui sert à évaluer, d'une part, l'impact des facteurs de risque sur cette performance en analysant leur

contribution à la défaillance des barrières de sécurité et à l'occurrence des conséquences indésirables. La finalité de cette analyse étant la réduction du risque lié à ces conséquences au dessous des limites maximales tolérables, en agissant en autres sur les contraintes opérationnelles des événements initiateurs et des EdBs.

En effet, établir le niveau d'intégrité de sécurité SIL (Safety Integrity Level) requis ou cibles pour les systèmes instrumentés de sécurité et le niveau de confiance NC pour les autres barrières de sécurité n'est pas suffisant pour affirmer que l'installation industrielle répond aux critères d'acceptabilité du risque. Il serait donc nécessaire de vérifier si des améliorations devraient être apportées à tous les niveaux de l'installation par la mise en œuvre de bonnes pratiques, ce qui bien indiqué dans la première partie de la norme IEC 61508 [IEC 61508, 2010]. Si le risque est dans la zone tolérable qui est caractérisée par un risque non négligeable, la recherche des alternatives possibles relatives aux bonnes pratiques sera régie par l'application du principe ALARP (As Low As Reasonably Practicable) appuyé sur une analyse coût-bénéfice [Smith & Simpson, 2004].

## **II.6 Conclusion**

L'objectif de la démarche décrite dans ce chapitre est de fournir une méthodologie globale pour l'analyse opérationnelle du risque et l'évaluation de la performance des barrières de sécurité qui pourrait être applicable aux différents secteurs industriels. Cette démarche consiste en une extension de la méthode BORA et est appelée BORA-CIA. En effet BORA-CIA comporte deux principales parties:

- Une première partie «BORA conventionnelle», permettant de modéliser la séquence des scénarios d'accidents, en partant d'événements initiateurs et en passant par les différentes barrières existantes dont les défaillances sont analysées par l'Arbre de Défaillance. La caractéristique principale de cette modélisation est la prise en compte des facteurs de risque opérationnels aux des événements initiateurs et des EdBs.
- Une seconde partie est basée sur une «Analyse d'Importance de Criticité». En effet, en utilisant les résultats issus de la première partie, le modèle d'analyse de criticité proposé a pour objectif de mener une analyse d'importance des EdBs en tenant compte de leur environnement opérationnel. Selon les effets des facteurs de risque liés à ces événements, l'ordre de leur importance pourrait changer, ce qui serait un support important pour l'optimisation voir même la révision de la stratégie de maintenance et d'inspection.

Pour une étude de faisabilité et de validation de l'approche BORA-CIA, une mise en œuvre de cette approche est réalisée par une étude de cas réel. Cette étude fera l'objet du troisième chapitre.

# **CHAPITRE III**

## **ÉTUDE DE CAS ET VALIDATION DE L'APPROCHE PROPOSÉE (BORA-CIA)**

### **III.1 Introduction**

Ce chapitre est consacré à la mise en œuvre de l'approche proposée (BORA-CIA) dans le deuxième chapitre. L'objectif visé est de valider cette approche en montrant l'intérêt de la combinaison de la méthode «BORA» conventionnelle avec l'analyse d'importance de criticité «CIA» dans l'analyse des risques et l'évaluation des performances des barrières de sécurité et ce, à travers une étude de cas d'un système industriel opérationnel. Nous présentons d'abord le système industriel choisi pour concrétiser l'approche à savoir le «Séparateur (G01-VN-45-01) de l'unité de traitement de gaz 'UTGA' SONATRACH. Nous présentons ensuite les différentes étapes de la démarche tout en portant notre attention sur les résultats obtenus au terme de chaque étape. Puis, nous concluons cette partie par une évaluation des apports obtenus par cette approche au profit de l'approche BORA-CIA conventionnelle. Enfin, nous évoquons certaines limites encourues au cours de notre investigation.

## III.2 Description du processus et identification des risques

Notre étude se focalise particulièrement sur le séparateur (G01-VN-45-01), première ligne de séparation du flux de puits de pétrole en composants gazeux et liquides. Il est considéré comme un élément essentiel dans le traitement du pétrole et du gaz. Au terme de cette séparation, une première partie du gaz est envoyée vers le réservoir au moyen du contrôleur de niveau (LIC-11009). Une autre partie (gaz combustible) est réutilisée pour alimenter le réchauffeur à basse pression; le reste est libéré vers la torche. Comme le montre la figure III.1, le séparateur est doté de plusieurs lignes de défense dont les principales sont les systèmes de contrôle et régulation de pression et de niveau, les soupapes de sécurité et les systèmes d'arrêt d'urgence. [Sonatrach, 2010].

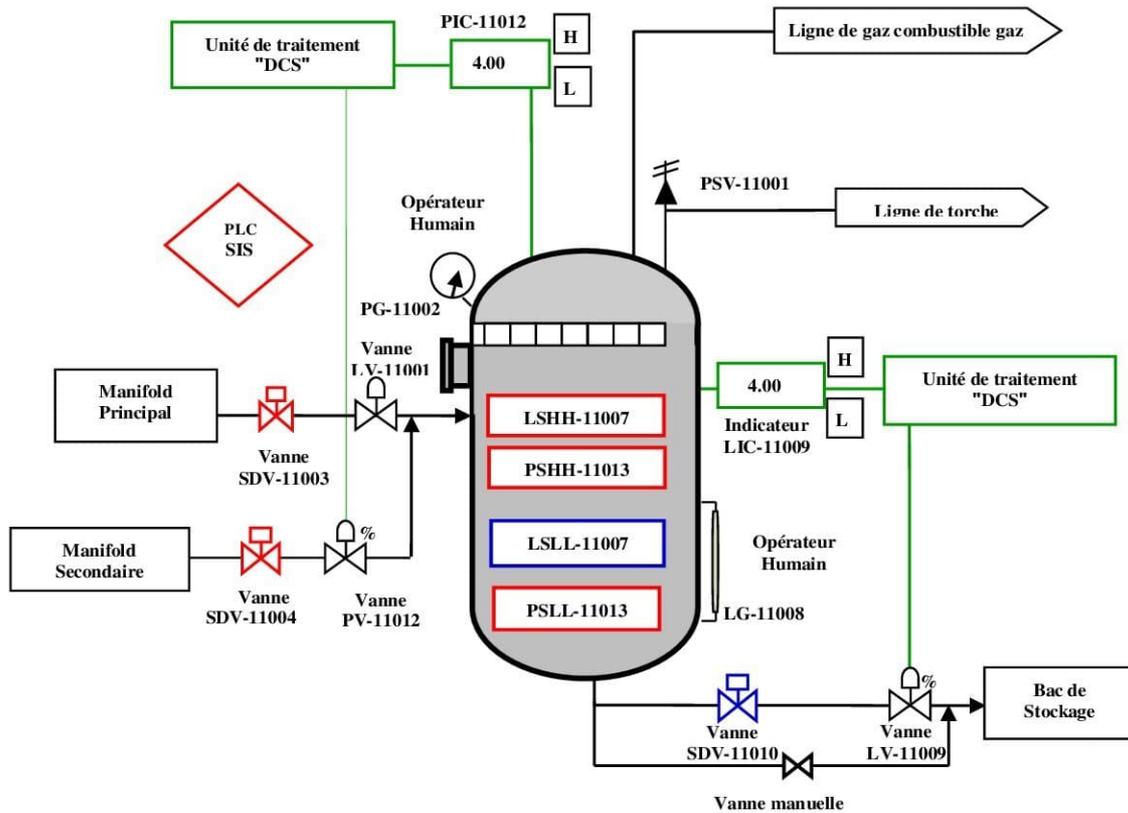


Figure III.1 Séparateur de pétrole/gaz (G01-VN-45-01)

### III.2.1 Analyse structurelle et fonctionnelle du séparateur

L'analyse structurelle et fonctionnelle est une étape indispensable permettant d'identifier les différentes parties du séparateur (G01-VN-45-01). Notons que cette analyse sert non seulement à décomposer le système en sous systèmes, en équipements et en composants, mais aussi à identifier les sous systèmes de sécurité existants. Les résultats de cette décomposition sont résumés dans le tableau (III.1).

Tableau III.1. Décomposition du système séparateur

Sous-système [Fonction principale]	Équipement [Fonction intermédiaire]	Composant [Fonction élémentaire]
Ss1 : ballon de gaz combustible [séparer le gaz de condensât].	E1.1: Circuit d'alimentation du ballon [assure l'alimentation de ballon en gaz et en condensât].	C1.1.1: Vanne SDV-11003 [ouverte en fonctionnement normal et assure l'alimentation de ballon en gaz d'après manifolds gaz de flash ; fermeture sur une alarme (LSHH, PSHH) pour la sécurité].
		C2.1.1: Vanne SDV-11004 [ouverte en fonctionnement normal et assure l'alimentation de ballon en gaz de secours du pipeline d'expédition de gaz; fermeture sur une alarme (LSHH, PSHH) pour la sécurité].
		C3.1.1: Vanne PV-11012 [ouverture en pourcentage pour admettre du gaz de secours, pour réguler la pression de gaz vers le ballon en fonction de la pression de gaz à la sortie de ballon].
	E2.1 : Ballon [séparer le gaz de condensât].	C1.2.1: Ballon de gaz combustible [Séparer le gaz de condensât et assure l'alimentation du four rebouilleur, Le balayage des réseaux de torche, Les pilotes des torches et La couverture du réservoir de stockage d'huile hors spécification en gaz].
	E1.1 : Circuit de vidange du ballon [assure le vidange de ballon en condensât].	C1.3.1: Vanne SDV-11010 [ouverte en fonctionnement normal et assure la sortie de condensât vers les drains fermées ; fermeture sur une alarme (LSLL, PSL) pour la sécurité].
		C2.3.1: Vanne LV-11009 [de type TOR ouverture et fermeture sur alarme (LAH, LAL) pour réguler le niveau de condensât dans le ballon].
Ss2 : système de contrôle et de régulation [contrôle et régulation des paramètres de procédé].	E1.2 : Boucle de régulation de niveau de condensât avec alarme (LC-11009) [contrôle et régulation de niveau de condensât dans le ballon].	C1.1.2: Capteur-transmetteur (capteur LIC-11009, transmetteur LTC-11009) de niveau [mesure le niveau de condensât dans le ballon et le transmet vers le DCS].
		C2.1.2: DCS [adaptation du niveau de liquide dans le ballon à une action sur la vanne LV-11009 et une alarme audio-visuel].
		C2.3.1: Vanne LV-11009 [de type TOR ouverture et fermeture sur alarme (LAH, LAL) pour réguler le niveau de condensât dans le ballon].
		C3.1.2: Opérateur humain [intervient pour éliminer la déviation avec plusieurs actions].
		C4.1.2: Vanne manuelle de by-pass
	E2.2 : Boucle de régulation de pression (PC-11012) avec alarme [contrôle et régulation de pression de gaz dans le ballon].	C1.2.2: Capteur-transmetteur (capteur PIC-11012, transmetteur PTC-11012) de pression [mesure la pression de gaz à la sortie de ballon vers le filtre de gaz combustible].
		C2.1.2: DCS [adaptation de l'abaissement de la pression de gaz dans le ballon par action sur la vanne PV-11012 et une alarme audio-visuel].
		C3.1.1: Vanne PV-11012 [ouverture en pourcentage, afin d'admettre du gaz de secours, pour réguler la pression de gaz vers le ballon en fonction de la pression de gaz à la sortie de ballon].
		C4.2.2: Opérateur humain [intervention pour éliminer la déviation avec plusieurs actions].
	E1.3 : Equipement de surveillance de la pression de gaz dans le ballon [surveiller la pression de gaz dans le ballon].	C1.2.2: Manomètre PG-11002 [mesure la pression de gaz dans le ballon].
C3.1.3: Opérateur humain [vérifier régulièrement la pression de gaz dans le ballon chaque six heures et établir la liste des valeurs seuils].		
E1.3 : Equipement de surveillance de niveau de condensât dans le ballon [surveiller le niveau de condensât dans le ballon].	C1.3.3: Niveau à glass LG-11008 [mesure le niveau de condensât dans le ballon].	
	C3.1.3: Opérateur humain [vérifier régulièrement le niveau de condensât dans le ballon chaque six heures et établir la liste des valeurs seuils].	
	C4.1.2: Vanne manuelle de by-pass	

Ss4 : ESD (Emergency Shut Down) [assurer l'arrêt total du système de gaz combustible].	E1.4 : LSHH-11007 [sécurité de très haut niveau de condensât].	C1.1.4: Capteur-transmetteur (capteur LIS-11007, transmetteur LTS-11007) de très haut niveau [mesure le niveau très haut de condensât dans le ballon].
		C2.1.4 : PLC TRICONEX [adaptation de la mesure de très haut niveau de condensât dans le ballon à une action sur les vannes SDV-11003, SDV-11004].
		C1.1.1: Vanne SDV-11003 [fermeture sous un signal de très haut niveau pour couper l'alimentation du ballon en gaz et en condensât]
		C2.1.1: Vanne SDV-11004 [fermeture sous un signal de très haut niveau pour couper l'alimentation du ballon en gaz de secours].
	E2.4 : LSSL-11007 [sécurité de très bas niveau de brut].	C1.2.4: Capteur-transmetteur (capteur LIS-11007, transmetteur LTS-11007) de très bas niveau [mesure le niveau très bas de condensât dans le ballon].
		C2.1.4: PLC TRICONEX [adaptation de la mesure de très bas niveau de condensât dans le ballon à une action sur la vanne SDV-11010].
		C1.3.1: Vanne SDV-11010 [fermeture sous un signal de très bas niveau pour couper la sortie de condensât].
	E3.4 : PSHH-11013 [sécurité de très haute pression de gaz dans le ballon].	C1.3.4: Capteur-transmetteur (capteur PIS-11013, transmetteur PTS-11013) de très haute pression [mesure la pression très haute de gaz dans le ballon].
		C2.1.4: PLC TRICONEX [adaptation de la mesure de très haute pression de gaz dans le ballon à une action sur les vannes SDV-11003, SDV-11004].
		C1.1.1: Vanne SDV-11003 [fermeture sous un signal de très haut niveau pour couper l'alimentation de ballon en gaz et en condensât]
		C2.1.1: Vanne SDV-11004 [fermeture sous un signal de très haut niveau pour couper l'alimentation de ballon en gaz de secours].
	E4.4 : PSSL-11013 [sécurité de très basse pression de gaz dans le ballon]	C1.4.4: Capteur-transmetteur (capteur PIS-11013, transmetteur PTS-11013) de très basse pression [mesure la pression très basse de gaz dans le ballon].
C2.1.4: PLC TRICONEX [adaptation de la mesure de très haut niveau de condensât dans le ballon à une action sur la vannes SDV-11010].		
C1.3.1: Vanne SDV-11010 [fermeture sous un signal de très bas niveau pour couper la sortie de condensât].		
Ss5 : système de protection [réduire les conséquences d'une déviation ou d'un accident]	E1.5 : Protection contre la surpression [intervenir en cas d'une surpression].	C1.1.5: Torche BP A/B [évacuation de gaz].
		C2.1.5: Soupape de sécurité PSV-11001 [dimensionnée pour évacuer le gaz bloqué].
	E2.5 : Protection contre les nuages explosifs [intervenir en cas d'une fuite].	C1.2.5: Détecteur de gaz IR 2100 [détection de gaz].
		C2.2.5: PLC F&G [adapter la détection de gaz à une alarme audio-visuelle]

Notons que les informations fournies par cette analyse constitueront une base de données pour l'application de la démarche proposée dans le deuxième chapitre, laquelle est l'objet de ce chapitre.

### III.2.2 Identification des accidents majeurs au niveau séparateur

L'identification des scénarios d'accidents au niveau du séparateur est faite par la méthode HAZOP (Hazard and Operability Studies). Son principe est de décomposer le séparateur en sous-ensembles appelés «nœuds » puis, à l'aide de mots-clés, de faire varier les paramètres autour de ses points de consigne. L'analyse des déviations est effectuée dans le but d'identifier les situations conduisant à des risques potentiels pour les personnes, les

biens et l'environnement. Elle permet aussi d'envisager les différentes barrières de sécurité pouvant empêcher l'occurrence de ces accidents. Plusieurs scénarios d'accidents étaient identifiés par la méthode HAZOP.

Dans notre étude, la sélection s'est portée sur deux scénarios ayant comme conséquences : incendie et explosion suivis d'arrêt de l'unité de production. Le tableau III.2 présente ces deux scénarios avec les causes et les conséquences correspondantes.

Tableau III.2. Scénarios d'accident retenus relatifs au séparateur

N°	Mot-clé	Élément	Dérive	Causes	Conséquences	Protections
Scénario 1	Pas/ Moins	Débit du condensât	Pas/ Moins de débit	Défaillance de la vanne (LV-11001) (bloquée ouverte)	Infiltration de liquide dans le rebouilleur. Incendie) & arrêt d'unité.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Détection de la déviation (L≥63%).</li> <li>- Alarme niveau élevé (LAH-11009)</li> <li>- Opérateur humain</li> <li>- Arrêt d'urgence ESD (SIS "LSSH-11007") (L ≥ 74%),</li> </ul>
Scénario 2	Très Haute	Pression	Très haute pression	Défaillance de la vanne (PV-11012 en position ouverte (surpression))	surpression à l'intérieur du séparateur, explosion possible et l'arrêt d'unité	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Alarme de pression élevée (PAH-11012)</li> <li>- Opérateur humain.</li> <li>- Soupape de sécurité de pression.</li> <li>- ESD (SIS-PSHH-11013)</li> </ul>

### III.3 Partie 1 : Application de BORA conventionnelle

#### III.3.1 Élaboration des scénarios d'accident

##### III.3.1.1 Premier scénario d'accident : Incendie

- **Élaboration du diagramme bloc barrières**

La conséquence indésirable de ce scénario est un incendie survenu suite à une défaillance de la vanne (LV-11001). Afin de prévenir l'occurrence de cet événement, les fonctions de sécurité sont réalisées par les barrières de sécurité suivantes (voir figure III.2):

- Un système d'alarme de haut niveau avec action de l'opérateur : la fonction de sécurité est assurée par l'ensemble composé d'un capteur de pression (CP2), de l'automate de conduite (AC) et d'un opérateur agissant soit depuis la salle de contrôle, soit manuellement sur les deux vannes de sécurité (LV11009 et LV11010);
- Un système instrumenté de sécurité (SIS), constitué de deux capteurs de pression, d'un automate de sécurité (AS) et des vannes d'arrêt d'urgence (SDV11003 et SDV11004);

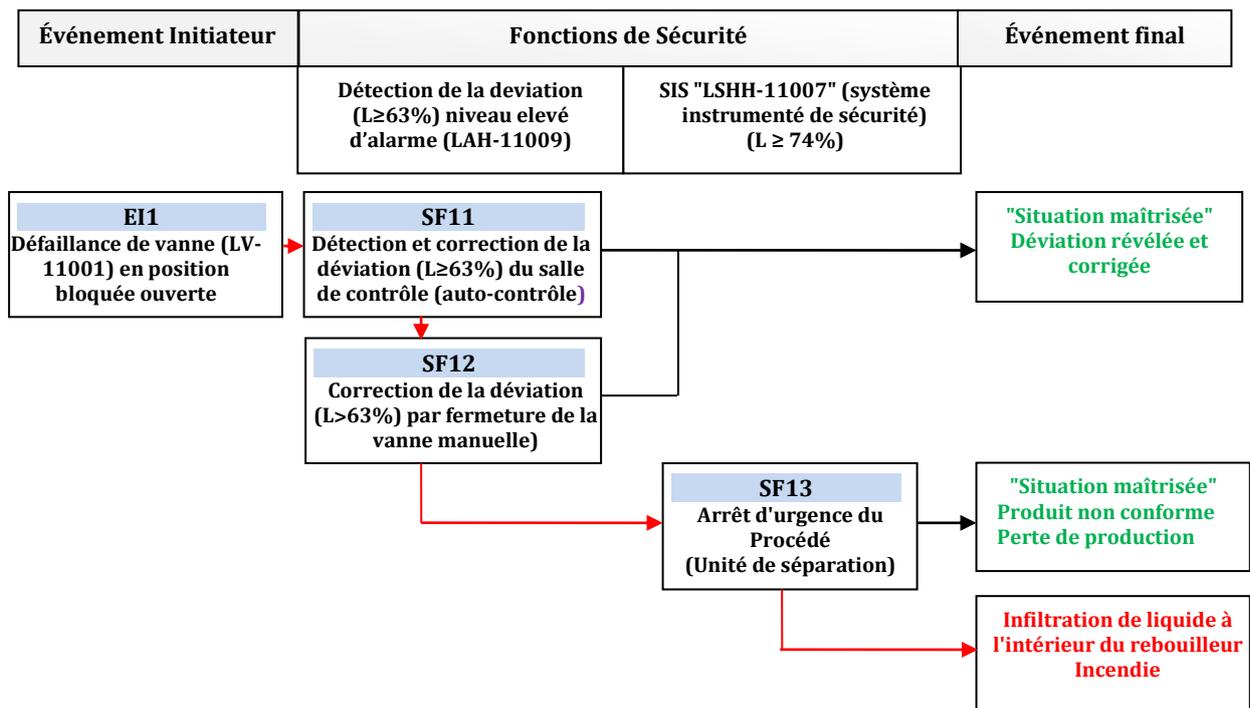


Figure III.2 Diagramme bloc barrières. Cas du premier scénario (incendie).

• **Développement des arbres de défaillance des fonctions de sécurité**

Les figures III.3-a, b, c montrent les arbres de défaillances des fonctions de barrières de sécurité SF11, SF12 et SF13 tenant en compte de leurs architectures. En considérant les probabilités des événements de base, les PFDavg des fonctions de sécurité sont calculées moyennant ces arbres de défaillance et rapportés dans le tableau III.6.

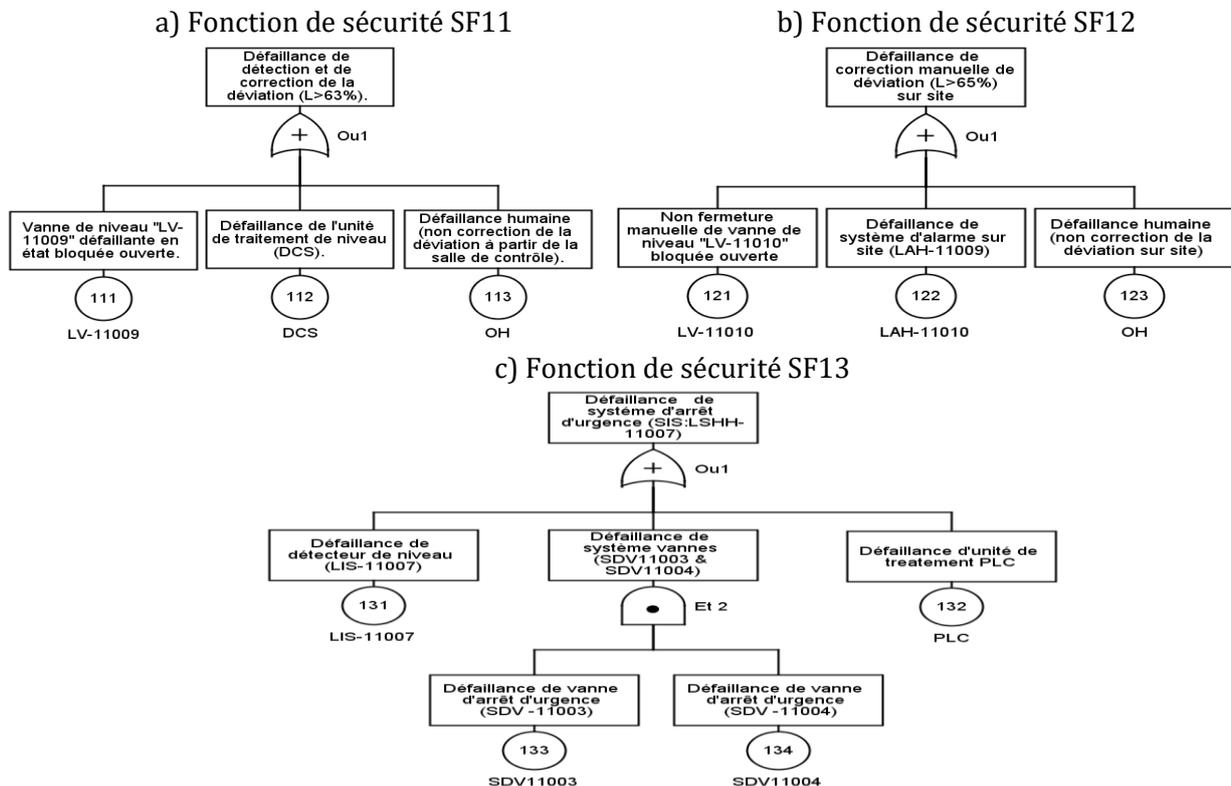


Figure III.3. Arbres de défaillances des fonctions de sécurité. Cas du premier scénario (Incendie).

### III.3.1.2 Second scénario d'accident: Explosion

- **Élaboration du diagramme bloc barrières**

La conséquence indésirable de ce scénario est une explosion survenue suite à une défaillance de la vanne (PV-11012)". Afin de prévenir l'occurrence de cet événement, les fonctions de sécurité sont réalisées par les barrières de sécurité suivante (voir figure III.4):

- Une alarme de haute pression au seuil ( $4,5 \leq P \leq 5,5$  bar) avec action de l'opérateur : c'est une fonction assurée par l'ensemble composé d'un capteur de pression (CP2), de l'automate de conduite (AC) et d'un opérateur agissant soit depuis la salle de contrôle, soit manuellement sur les deux vannes de sécurité (V-By-pass);
- Une soupape PSV qui se déclenche au seuil ( $P \geq 6.5$  bar) pour dégager l'excès de pression à l'intérieur du séparateur.
- Un système instrumenté de sécurité (SIS-PSHH-11013), constitué de deux capteurs de pression, d'un automate de sécurité (AS) et des vannes de sécurité (SDV11003 et SDV11004).

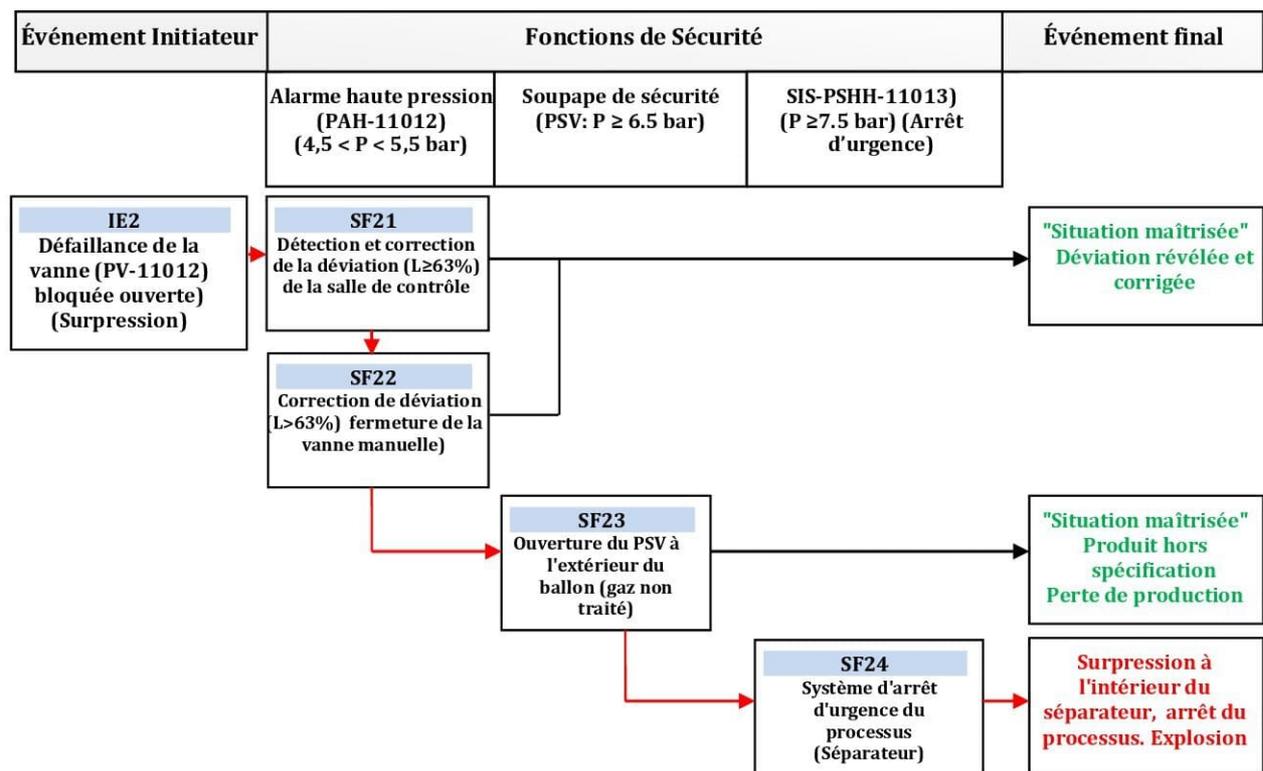


Figure III.4. Diagramme bloc barrières. Cas du second scénario (Explosion).

- **Développement des arbres de défaillance des fonctions de sécurité**

Les figures III.5-a, b, c et d montrent les arbres de défaillances des fonctions de barrières de sécurité SF21, SF22, SF23 et SF24 tenant compte de leurs architectures.

Les probabilités des événements de base ainsi que les PFDavg des fonctions de sécurité calculées à partir de ces arbres sont données dans le tableau III.7.

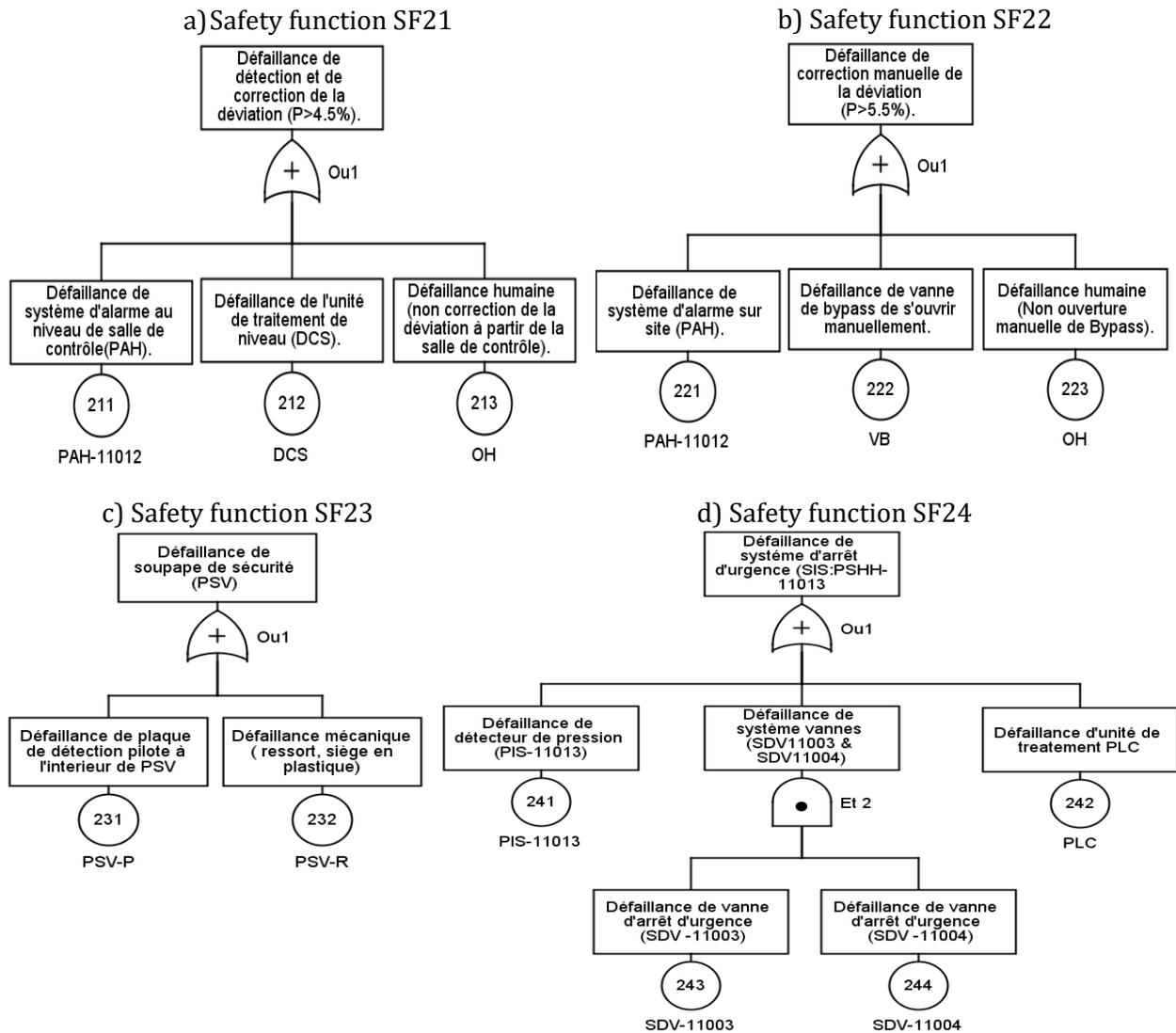


Figure III.5. Arbres de défaillances des fonctions de sécurité. Cas du second scénario (explosion)

### III.4 Attribution des fréquences et des probabilités moyennes

Les fréquences et les probabilités moyennes sont attribuées aux événements initiateurs des DBB et aux événements de base des arbres de défaillance. Ces données sont extraites des bases de données internes de l'entreprise (données historiques) et de bases de données génériques [CCPS, 1989; CCPS, 2001; ICSI, 2011; INERIS, 2005; SINTEF, 2010; Sonatrach, 2010]. Toutes ces données sont présentées dans les tableaux III.6 et III.7.

### III.5 Calcul des fréquences moyennes des scénarios accidents

Les fréquences moyennes des deux scénarios d'accidents sont calculées à l'aide de l'équation II.1 (voir chapitre II, section II.4.3) en utilisant les fréquences et les probabilités moyennes (Tableaux III.6 et III.7). Ainsi, les fréquences moyennes calculées sont respectivement 1.32E-04/an et de 1.01E-05/an pour le premier et le second scénario. Les opérations du calcul sont comme suit:

- Scénario 1:  $f_{req} = f_{EI1} \cdot PFD_{SF11} \cdot PFD_{SF12} \cdot PFD_{SF13} = (1,00E-01) \cdot (2,09E-01) \cdot (3,76E-01) \cdot (1,67E-02) = 1,32E-04/an.$
- Scénario 2:  $f_{req} = f_{EI2} \cdot PFD_{SF21} \cdot PFD_{SF22} \cdot PFD_{SF23} \cdot PFD_{SF24} = (1,30E-01) \cdot (4,04E-01) \cdot (3,31E-02) \cdot (1,09E-01) \cdot (5,30E-02) = 1.01E-05/an.$

### III.6 Identification des facteurs d'influence des risques (RIFs)

Cette étape consiste à identifier les RIFs relatifs aux événements initiateurs et aux événements de base de chaque scénario d'accident. Les résultats de cette identification sont présentés dans les tableaux III.3 et III.4. En effet, ces RIFs décrivent les facteurs techniques, organisationnels et humains contribuant à l'occurrence des événements initiateurs et aux défaillances des barrières de sécurité. Notons que tous les facteurs sont identifiés en collaboration avec les analystes de risques, techniciens et ingénieurs de maintenance et d'instrumentation de l'unité de traitement UTGA en se référant aux RIFs génériques décrits dans le manuel BORA [Haugen et al, 2010] (voir annexe A).

Tableau III.3. RIFs relatifs au premier scénario (Incendie).

Événements initiateur et de base	Facteurs d'influence des risques (RIFs)
<b>Événement initiateur IE1: " Défaillance de la vanne (LV-11001)</b>	
<b>E11</b>	RIF111 : Corrosion du mécanisme de la vanne RIF112 : Maintenabilité avec un proof test périodique inadéquat (un test/an) RIF113 : Compétence du technicien de zone (action non exécutée correctement), formation
<b>SF11- Détection et correction de la déviation (L≥63%) du salle de contrôle ( auto-contrôle)</b>	
<b>E111</b>	RIF1111 : Maintenabilité avec un proof test inadéquat (un test par an) RIF1112 : Pression du temps : exécution incomplète d'une tâche spécifique RIF1113 : Mauvaise position du LIC et défaillance de la fonction "Pas de détection".
<b>E112</b>	RIF1121 : Complexité du processus (CPU, mémoire, connecteurs, modules d'entrée/sortie) RIF1122 : Maintenabilité avec un proof test périodique inadéquat) RIF1123 : Coupure électrique, tensions d'alimentation DC (pour piloter les sorties DCS) RIF1124 : Programme d'autocontrôle (aspect logiciel du traitement) RIF1125 : Interface homme-machine (conditions ergonomiques en salle de contrôle,...etc.)
<b>E113</b>	RIF1131 : Corrosion du mécanisme de la vanne RIF1132 : Maintenabilité avec un proof test périodique inadéquat : un test par an RIF1133 : Coupure électrique (pour alimenter la vanne en électricité) RIF1134 : Complexité du processus (pas de retour fonctionnel du DCS)
<b>SF12- Correction de la déviation (L&gt;63%) par fermeture de la vanne manuelle) (3<sup>ème</sup> niveau de contrôle)</b>	
<b>E121</b>	RIF1211 : Faux retour du salle de contrôle RIF1212 : Maintenabilité avec un proof périodique inadéquat: un seul test / an RIF1213 : Coupure électrique ( alimentation de l'alarme en électricité)
<b>E122</b>	RIF1221 : Incompétence humaine: procédure non exécutée correctement RIF1222 : Pression du temps : exécution incomplète d'une tâche spécifique RIF1223 : IHM (absence de réponse à l'alarme)
<b>E123</b>	RIF1231 : Propriétés des matériaux : corrosion du mécanisme de la vanne RIF1232 : Maintenabilité avec un proof test périodique inadéquat RIF1233 : Conditions techniques défavorables pour exécuter avec perfection la tâche

<b>SF13- SIS : Système d'arrêt d'urgence du processus (séparateur)</b>	
<b>E131</b>	RIF1311 : Maintenabilité/Accessibilité : espace, outils RIF1312 : Pression du temps : exécution incomplète d'une tâche spécifique RIF1313 : Équipement en position inappropriée, LIS ne détecte pas un niveau élevé de gaz
<b>E132</b>	RIF1321 : Complexité du processus (CPU, mémoire, connecteurs, modules d'entrée/sortie) RIF1322 : Maintenabilité/accessibilité: proof test inadéquat: inaccessibilité lors d'exécution RIF1323: Coupure électrique pour piloter les sorties des automates RIF1324 : Conditions environnementales, en particulier la poussière RIF1325 : IHM (conditions ergonomiques dans la salle de contrôle,...etc.)
<b>E133</b>	RIF1331 : Corrosion du mécanisme de la vanne RIF1332 : Maintenabilité avec un proof test périodique inadéquat : un seul test /an RIF1333 : Panne électrique (pour alimenter la vanne en électricité)
<b>E134</b>	RIF1341 : Corrosion du mécanisme de la vanne RIF1342 : Maintenabilité avec un proof test périodique inadéquat : un seul test/an RIF1343 : Panne électrique (pour alimenter la vanne en électricité)

Tableau III.4. RIFs relatifs au second scénario (Explosion).

<b>Événements initiateur et de base</b>	<b>Facteurs d'influence des risques (RIFs)</b>
<b>Événement initiateur IE2 : " Défaillance de la vanne (LV-11012)</b>	
<b>E12</b>	RIF211 : Propriétés des matériaux : Composant chimique agressif provoquant la corrosion RIF212 : Maintenabilité avec un proof test périodique inadéquat (un seul test/an) RIF213 : Incompétence du technicien de zone (action non exécutée correctement), formation
<b>SF21- Détection et correction de la déviation (L≥63%) du salle de contrôle ( auto-contrôle)</b>	
<b>E211</b>	RIF2111 : Maintenabilité avec un mauvais étalonnage périodique (un seul test/an). RIF2112 : Pression du temps : exécution incomplète d'une tâche spécifique RIF2113 : Mauvaise position du LIS pour la fonction assignée "détecter une haute pression".
<b>E212 (Idem que E112)</b>	RIF2121 : Complexité du processus (CPU, mémoire, connecteurs, modules d'entrée/sortie) RIF2122 : Maintenabilité avec un proof test périodique inadéquat) RIF2123 : perturbation de programme d'autocontrôle (aspect logiciel du traitement) RIF2124 : IHM ( conditions ergonomiques dans la salle de contrôle, ...etc.) RIF2125 : coupure électrique pour commander les sorties DCS
<b>E213</b>	RIF2131 : Corrosion du mécanisme de la vanne (ressort...etc) RIF2132 : Maintenabilité avec un proof test périodique inadéquat: un test par an RIF2133 : Coupure électrique pour alimenter la vanne RIF2134 : Complexité du processus (pas de feedback du solveur DCS)
<b>SF22- Correction de la déviation (L&gt;63%) par fermeture de la vanne manuelle) (3<sup>ème</sup> contrôle)</b>	
<b>E221</b>	RIF2211 : Conditions d'environnement : Ne déclenche pas de signal ( poussière sur site) RIF2212 : Maintenabilité avec un proof test périodique inadéquat (un seul test / an) RIF2213 : Pas de feedback et défaillance de la communication de salle de contrôle
<b>E222</b>	RIF2221 : Compétence du technicien de zone (action non effectuée correctement) RIF2222: Pression du temps : exécution incomplète d'une tâche spécifique RIF2223 : HMI (Position feedback de l'alarme) : outils indisponibles sur site
<b>E223</b>	RIF2231 : Corrosion du mécanisme de la vanne RIF2232 : Maintenabilité avec un proof test périodique inadéquat RIF2233 : IHM: Position incorrecte, pas de conditions d'exécution de la tâche (outils...etc) RIF2234 : Permis de travail ( demande et suivi du signal d'alarme)

<b>SF23- Ouverture du PSV à l'extérieur du ballon (gaz non traité)</b>	
<b>E231</b>	RIF2311 : Pression du temps : Erreurs de synchronisation des PSV (calibrage incorrect) RIF2312 : Conception de l'équipement : montage, spécification et réglage incorrects RIF2313 : Calibrage de maintenance : Mauvais calibrage et outils non disponibles
<b>E232</b>	RIF2321 : Propriétés matérielles : Composant chimique agressif provoquant une corrosion RIF2322 : Pression du temps : Erreurs de synchronisation des PSV et calibrage incorrect RIF2323 : Maintenabilité et proof test inadéquat: espace, outils
<b>SF24- SIS (PSHH-11013) : Système d'arrêt d'urgence du processus (Séparateur)</b>	
<b>E241</b>	RIF2411 : Maintenabilité/Accessibilité : espace et outils inappropriés RIF2412 : Pression du temps : exécution incomplète d'une tâche spécifique de détection RIF2413 : Équipement en position incorrecte, le LIS ne détecte pas un niveau élevé de gaz
<b>E242 (Idem que E132)</b>	RIF2421 : Complexité du processus (CPU, mémoire, connecteurs, modules d'entrée/sortie) RIF2422 : Maintenabilité/accessibilité: proof test inadéquat: inaccessibilité lors d'exécution RIF2423: Coupure électrique pour piloter les sorties des automates RIF2424 : Conditions environnementales, en particulier la poussière RIF2425 : IHM( conditions ergonomiques dans la salle de contrôle,...etc.)
<b>E243 (Idem que E133)</b>	RIF2431 : Corrosion du mécanisme de la vanne RIF2432 : Maintenabilité avec un proof test périodique inadéquat : un test / an RIF2433 : Panne électrique (pour alimenter la vanne en électricité)
<b>E244 (Idem que E134)</b>	RIF2441 : Corrosion du mécanisme de la vanne RIF2442 : Maintenabilité avec un proof test périodique inadéquat : un test / an RIF2443 : Panne électrique (pour alimenter la vanne en électricité)

À noter que pour les deux scénarios, les RIFs liés aux fonctions de sécurité SF13 et au SF24 sont identiques car s'agissant de composants identiques.

### III.7 Attribution des poids et des scores aux RIFs

#### III.7.1 Attribution des poids (Wi)

L'attribution des poids aux RIFs est faite moyennant l'échelle du tableau II.1 du chapitre II. En effet, en se référant à la procédure de pondération décrite dans la section II.4.5.1 du chapitre II. Tous les RIFs identifiés sont pondérés. Les tableaux III.6 et III.7 montrent les résultats de cette pondération.

#### III.7.2 Attribution des scores (Qi)

L'attribution des scores aux RIFs est basée principalement sur une évaluation purement qualitative des statuts des RIFs. Pour ce faire, une échelle de cotation est proposée ci-dessous (voir tableau III.5). Cette échelle est le résultat d'une discussion avec des experts des processus pétroliers. En effet, Sur la base du statut (*Sti*) donné par ces experts, le score correspondant (*Qi*) est déduit à l'aide des équations (II.3)-(II.6) présentées au chapitre II.

Tableau III.5. Échelle proposée pour la cotation des RIFs

Statut de cotation	Description du niveau de conformité
A	Procédures respectées avec conformité par rapport aux standards et normes exigés.
B	Procédures respectées avec moins de conformité par rapport aux standards et normes exigés.
C	Procédures respectées avec conformité moyenne par rapport aux standards et normes exigés.
D	Procédures sont pas exécutées conformément aux standards et normes exigés.
E	Procédures sont pas respectées avec faible conformité par rapport aux standards et normes exigés.
F	Procédures non respectées, non conformité par rapport aux standards et normes exigés.

### III.8 Résultats de BORA conventionnelle

Les résultats de la méthode BORA conventionnelle appliqué aux deux scénarios d'accidents, peuvent être envisagés à plusieurs niveaux de calcul à savoir:

#### III.8.1 Variation des fréquences et probabilités des événements initiateurs et de base

La détermination des fréquences et des probabilités révisées des événements initiateurs et des événements de base, est faite moyennant l'équation II.8 (voir chapitre II, section II.4.6). Les résultats obtenus sont donnés par les tableaux III.6 et III.7.

Tableau III.6. Fréquences/ probabilités moyennes, poids, scores et fréquences/probabilités révisées. Cas du premier scénario (Incendie).

Els / EdBs	Fmoy/Pmoy	Pinf	Psup	RIFs	Wi	St	MF	Frév/ Prév
<b>Événement initiateur EI1: "défaillance de la vanne (LV-11001)"</b>								
EI1	1.00E-01 /an	2.00E-02	5.00E-01	RIF11	2	C	1.58	1.58E-01 / an
				RIF12	4	B		
				RIF13	6	D		
<b>SF21- Détection et correction de la déviation (L≥63%) du salle de contrôle ( auto-contrôle)</b>								
E111	1.30E-02	4.33E-03	3.90E-02	RIF1111	4	B	0.79	1.03E-02
				RIF1112	8	B		
				RIF1113	4	C		
E112	1.10E-01	3.63E-02	3.30E-01	RIF1121	4	D	1.05	1.15E-01
				RIF1122	6	C		
				RIF1123	8	B		
				RIF1124	2	A		
				RIF1125	2	B		
E113	1.00E-01	2.00E-02	3.00E-01	RIF1131	2	C	1.19	1.19E-01
				RIF1132	4	B		
				RIF1133	8	D		
				RIF1134	4	B		

SF12- Correction de la déviation (L>63%) par fermeture de vanne manuelle) (3 <sup>ème</sup> niveau de contrôle)								
E121	3.00E-01	1.50E-01	6.00E-01	RIF1211	6	A	0.46	1.37E-01
				RIF1212	4	B		
				RIF1213	8	B		
E122	1.00E-01	3.30E-02	3.00E-01	RIF1221	10	D	1.56	1.56E-01
				RIF1222	6	D		
				RIF1223	4	C		
E123	1.00E-02	3.30E-03	3.00E-02	RIF1231	2	C	1.10	1.10E-02
				RIF1232	6	B		
				RIF1233	4	E		
SF13- SIS : Système d'arrêt d'urgence du process (séparateur)								
E131	1.34E-02	4.42E-03	4.02E-02	RIF1311	6	B	0.27	3.60E-03
				RIF1312	8	A		
				RIF1313	2	A		
E132	3.16E-03	6.32E-04	1.58E-02	RIF1321	2	D	1.17	3.69E-03
				RIF1322	8	C		
				RIF1323	10	B		
				RIF1324	4	E		
				RIF1325	4	C		
E133	1.36E-02	4.49E-03	4.08E-02	RIF1331	2	C	1.37	1.87E-02
				RIF1332	6	B		
				RIF1333	8	D		
				RIF1334	6	E		
E134	1.36E-02	4.49E-03	4.08E-02	RIF1341	2	C	1.37	1.87E-02
				RIF1342	6	B		
				RIF1343	8	D		
				RIF1344	6	E		

Tableau III.7. Fréquences/probabilités moyennes, poids, scores et fréquences/probabilités révisées. Cas du second scénario (Explosion).

Els / EdBs	Fmoy/Pmoy	Pinf	Psup	RIFs	Wi	St	MF	Frév /Prév
Événement initiateur EI2 : " Défaillance de la vanne (LV-11001)								
EI2	1.30E-01/an	2.60E-02	6.50E-01	RIF21	2	B	1.52	1.97E-01 /an
				RIF22	4	B		
				RIF23	6	D		
SF21- Détection et correction de la déviation (L≥63%) du salle de contrôle (auto-contrôle)								
E211	3.16E-01	1.04E-01	9.48E-01	RIF2111	4	B	0.44	1.38E-01
				RIF2112	8	B		
				RIF2113	4	A		

<b>E212</b>	<b>1.10E-01</b>	3.63E-02	3.30E-01	RIF2121	4	D	1.05	<b>1.15E-01</b>
				RIF2122	6	C		
				RIF2123	8	B		
				RIF2124	2	A		
				RIF2125	2	B		
<b>E213</b>	<b>1.00E-01</b>	2.00E-02	3.00E-01	RIF2131	2	C	1.46	<b>1.46E-01</b>
				RIF2132	4	B		
				RIF2133	8	D		
				RIF2134	4	B		
<b>SF22- Correction de la déviation (L&gt;63%) par fermeture de la vanne manuelle) (3<sup>ème</sup> contrôle)</b>								
<b>E221</b>	<b>1.00E-03</b>	5.00E-04	2.00E-03	RIF2211	2	E	1.41	<b>1.41E-03</b>
				RIF2212	4	B		
				RIF2213	8	D		
<b>E222</b>	1.00E-02	3.30E-03	3.00E-02	RIF2221	10	C	1.27	<b>1.27E-02</b>
				RIF2222	4	D		
				RIF2223	6	C		
<b>E223</b>	2.24E-02	7.39E-03	6.72E-02	RIF2231	2	B	1.17	<b>2.61E-02</b>
				RIF2232	6	C		
				RIF2233	4	D		
<b>SF23- Ouverture du PSV à l'extérieur du ballon (gaz non traité)</b>								
<b>E231</b>	1.00E-01	3.30E-02	3.00E-01	RIF2311	8	E	1.37	<b>1.37E-01</b>
				RIF2312	4	B		
				RIF2313	6	B		
<b>E232</b>	1.00E-02	2.00E-03	5.00E-02	RIF2321	2	D	2.03	<b>2.03E-02</b>
				RIF2322	4	A		
				RIF2323	6	B		
<b>SF24- SIS (PSHH-11013) : Système d'arrêt d'urgence du l'unité (Séparateur)</b>								
<b>E241</b>	1.20E-02	8.68E-03	7.89E-02	RIF2411	6	B	0.27	<b>3.23E-03</b>
				RIF2412	8	A		
				RIF2413	2	A		
<b>E242</b>	3.16E-03	6.32E-04	1.58E-02	RIF2421	2	D	1.17	<b>3.69E-03</b>
				RIF2422	8	C		
				RIF2423	10	B		
				RIF2424	4	E		
				RIF2425	4	C		
<b>E243</b>	1.36E-02	4.49E-03	4.08E-02	RIF2431	2	C	1.37	<b>1.87E-02</b>
				RIF2432	6	B		
				RIF2433	8	D		
				RIF2434	6	E		

<b>E244</b>	1.36E-02	4.49E-03	4.08E-02	RIF2441	2	C	1.37	<b>1.87E-02</b>
				RIF2442	6	B		
				RIF2443	8	D		
				RIF2444	6	E		

Dans le cas du premier scénario, les histogrammes montrent qu'à l'exception de l'événement de base E131, les valeurs moyennes et révisées sont légèrement différentes et elles ont le même ordre de grandeur (Figure III.6). Ceci peut être interprété par les estimations des statuts des RIFs qui ont des valeurs de MF pratiquement proches de 1. Pour l'événement E131, la variation de l'ordre de grandeur du  $10^{-2}$  à  $10^{-3}$  peut être interprétée par le fait que les estimations des RIFs relatifs à cet événement ont un MF qui est pratiquement loin de 1.

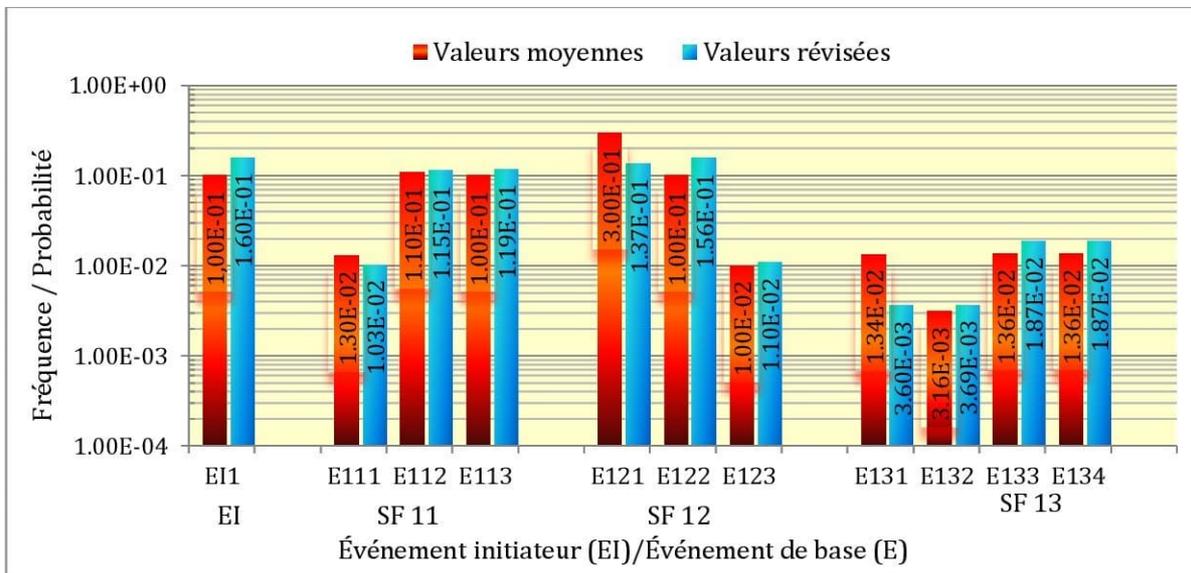


Figure III.6. Variation des fréquences et probabilités des événements initiateurs et de base avant et après révision. Cas du premier scénario.

Dans le cas du second scénario, les histogrammes montrent qu'à l'exception de l'événement de base E241, les valeurs moyennes et révisées sont aussi légèrement différentes et elles ont le même ordre de grandeur (Figure III.7). Ceci peut être interprété par les estimations des statuts des RIFs qui ont des valeurs de MF pratiquement proches de 1. Pour l'événement E241, la variation de l'ordre de grandeur du  $10^{-2}$  à  $10^{-3}$  peut être interprétée par le fait que les estimations des RIFs relatifs à cet événement ont un MF qui est pratiquement loin de 1.

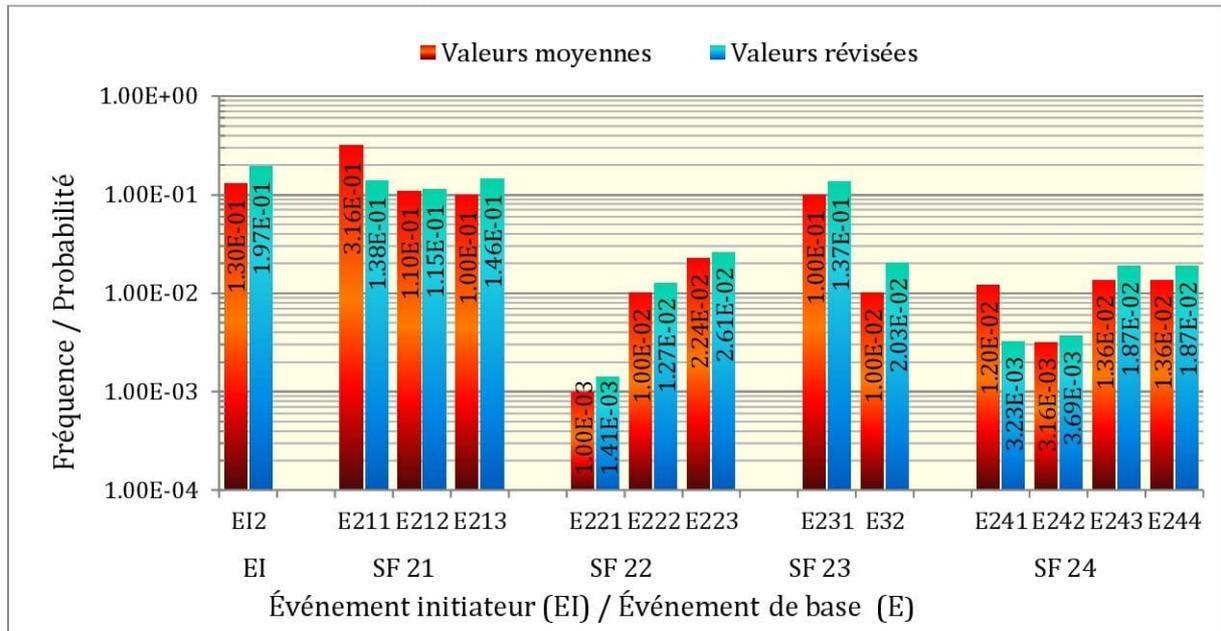


Figure III.7. Variation des fréquences et probabilités de des événements initiateurs et de base avant et après révision. Cas du second scénario.

### III.8.2 Variation des indisponibilités des barrières de sécurité

La détermination des indisponibilités révisées des barrières de sécurité est faite moyennant les arbres de défaillances des figures III.3 et III.5. Les résultats obtenus sont visualisés par les figures III.8 et III.9.

Dans le cas du premier scénario, les histogrammes montrent une variation des PFDs des fonctions de sécurité avant et après révision (Figure III.8). En effet, nous constatons qu'il ya une légère augmentation de la PFD de SF11 et une légère diminution de PDF de SF12 avec même ordre de grandeur après révision. Ceci peut être interprété par les estimations des statuts des RIFs qui ont des valeurs de MF pratiquement proches de 1. Pour la fonction de sécurité SF13, la variation de l'ordre de grandeur du  $10^{-2}$  à  $10^{-3}$  peut être interprétée par le fait que les estimations des RIFs relatifs à cet événement ont un MF qui est pratiquement loin de 1.

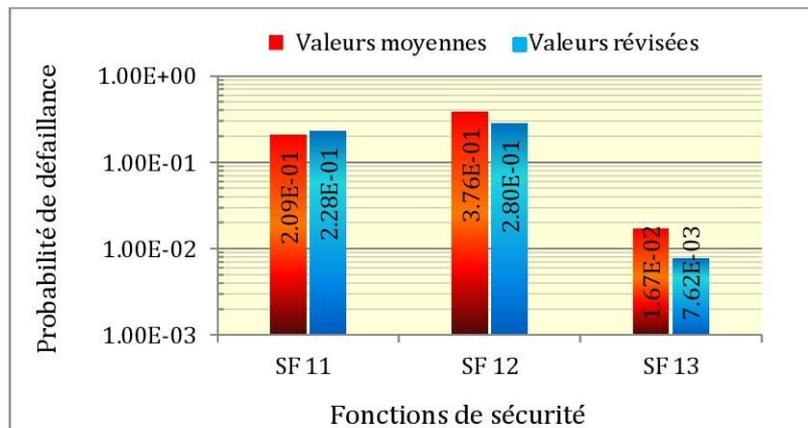


Figure III.8. Variation des probabilités de défaillance des fonctions de sécurité avant et après révision. Cas du premier scénario.

Dans le cas du deuxième scénario, nous constatons une variation des PFDs des fonctions de sécurité avant et après révision. En effet, il existe une légère variation (Augmentation/diminution) des PFDs des fonctions SF21, SF22 et SF23 et une légère augmentation/diminution de PFD de SF12 avec même ordre de grandeur (Figure III.9). Ceci peut être interprété par les estimations des statuts des RIFs qui ont des valeurs de MF pratiquement proches de 1.

Pour la fonction de sécurité SF24, la variation est passée de l'ordre de grandeur du  $10^{-2}$  à  $10^{-3}$ . Ceci peut être interprété par les estimations des RIFs relatifs à cette fonction ont un MF qui est pratiquement loin de 1.

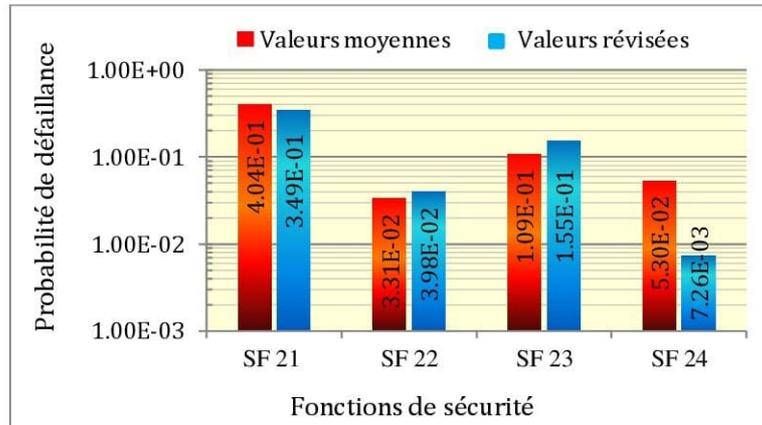


Figure III.9. Probabilités de défaillance des fonctions de sécurité avant et après révision. Cas du second scénario.

### III.8.3 Variation des fréquences des scénarios d'accident

La détermination des fréquences révisées des deux scénarios d'accident est faite en utilisant l'équation (II.10) du chapitre II. Les résultats obtenus sont visualisés par la figure III.10. En effet, les fréquences révisées des deux scénarios sont respectivement,  $7.69E-05$ /an et  $3.06E-06$ /an comparées aux fréquences moyennes obtenues avant révision  $1.32E-04$ /an et  $1.01E-05$ /an.

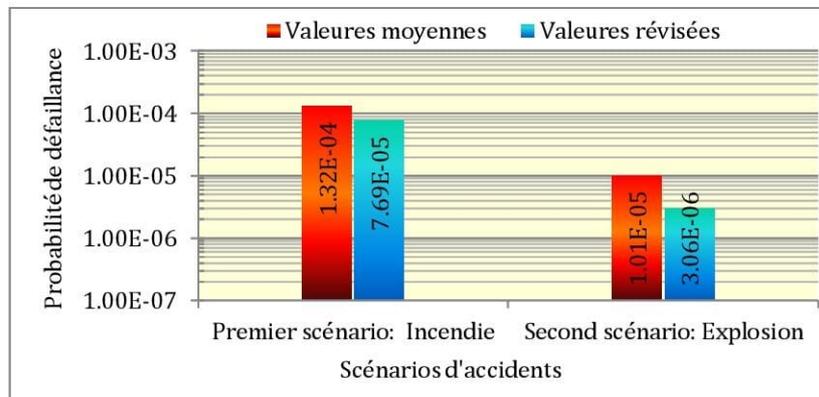


Figure III.10. Fréquences des scénarios d'accidents avant et après révision.

En examinant les résultats, on observe une diminution des deux fréquences des scénarios d'accident passant des ordres de grandeur  $10^{-4}$  à  $10^{-5}$  et de  $10^{-5}$  à  $10^{-6}$ . Dans le cas du premier scénario, la différence est due à la diminution des probabilités de défaillance des fonctions de sécurité SF12 et SF13 après révision, et dans le cas du second scénario, elle est due à la diminution des probabilités de défaillance des fonctions de sécurité SF21 et SF24. Ceci peut être interprété par les estimations des RIFs relatifs à cette fonction qui ont un MF qui est pratiquement loin de 1.

### **III.9 Discussion sur l'applicabilité de la BORA dans notre étude de cas**

Dans cette étude de cas, la méthode BORA est appliquée pour analyser les barrières proactives dans la phase opérationnelle du système de séparation des huiles et des gaz. Des barrières de sécurité telles que les alarmes, soupape de sécurité et le SIS sont analysées. Il a été démontré que la méthode BORA est très adaptée à l'analyse qualitative et quantitative des barrières en incluant des facteurs techniques, humains et opérationnels.

D'un point de vue pratique, cette méthode offre de nombreux avantages dont les principaux sont les suivants:

- i) Elle permet d'analyser le risque dans un contexte réel en tenant compte des facteurs influençant le risque,
- ii) Elle contribue à une meilleure compréhension des performances des barrières de sécurité en termes de fiabilité et d'intégrité.

Toutefois, la méthode BORA est basée sur des modèles d'analyse systémique (HAZOP, diagrammes de blocs de barrières et arbres de défaillance) et ces méthodes nécessitent des données étendues. Le séparateur est un système complexe et il a été nécessaire d'extraire des données et informations de la société SONATRACH, des bases de données telles que OREDA, des opérateurs sur site et des avis d'experts. La principale difficulté concerne la détermination des RIFs, leurs statuts et importances. En effet, les RIFs sont difficiles à définir car ils ne sont pas toujours indépendants et pour estimer leur poids, nous devons dresser un tableau clair des relations entre eux [Rausand, 2011].

### **III.10 Intégration de l'analyse d'importance (CIA) dans BORA**

#### **III.10.1. Objectifs**

Cette section a, d'une part, pour objectif de présenter une extension de la méthode BORA par l'analyse d'importance de criticité des éléments des barrières de sécurité, et d'autre part, de montrer l'importance des effets réels des RIFs et leur influence sur les performances des barrières de sécurité et les risques inhérents au processus de séparation. Rappelons que l'analyse d'importance introduite dans cette partie permet de fournir des éléments d'aide à la décision pour améliorer la disponibilité des barrières de sécurité en identifiant les principaux éléments ou composants ayant des criticités élevées.

Notre analyse d'importance est effectuée moyennant le facteur d'importance critique (CIA). Ce facteur fiabiliste permet d'évaluer l'importance relative d'un composant en prenant en compte de façon conjointe ses contributions structurelle et probabiliste à la fiabilité de la barrière de sécurité. Il est en fait utile en cas de défaillance d'une barrière de sécurité pour identifier les composants à réparer en priorité, c'est-à-dire ceux dont la disponibilité est la plus susceptible de restaurer le fonctionnement de la barrière.

En effet, en se basant sur les résultats obtenus dans l'application de BORA, les valeurs des probabilités de défaillance moyennes et révisées relatives aux éléments des barrières de sécurité seront utilisées pour calculer leurs facteurs d'importance en vue de savoir l'importance des barrières de sécurité au niveau du système de séparation.

### **III.10.2 Détermination des facteurs d'importance « CIFmoy et CIFrév » et étude comparative**

Pour les deux scénarios d'accidents, en utilisant les équations (II.15) et (II.16) (voir chapitre II, section II.5.1), nous calculons les CIFs moyens et révisés relatifs aux composants des barrières de sécurité en tenant compte des probabilités moyennes et révisées calculées auparavant dans BORA conventionnelle. Les résultats obtenus sont donnés dans les tableaux III.8 et III.9 (Section III.11). Les figures III.11 et III.12 montrent les différences relatives  $\Delta$ CIFs calculées, moyennant l'équation II.17 (voir chapitre II, section II.5.2) pour tous les composants des barrières de sécurité.

En effet, nous constatons qu'il y a une variation des valeurs de facteurs d'importance critiques avant et après révision relatifs aux composants des barrières de sécurité. Cette variation  $\Delta$ CIFs varie soit dans un sens croissant (sens positif), soit dans un sens décroissant (sens négatif), comme l'indique le signe de la différence relative. Ces variations sont dues à l'influence de l'amplitude des RIFs sur les facteurs d'importance des composants après révision. On peut également constater que pour chaque événement de base, le CIF correspondant varie proportionnellement par rapport au facteur modifiant "MF" qui est la mesure des RIFs influençant cet événement. C'est-à-dire le CIF de l'événement de base augmente lorsque le MF correspondant augmente et inversement.

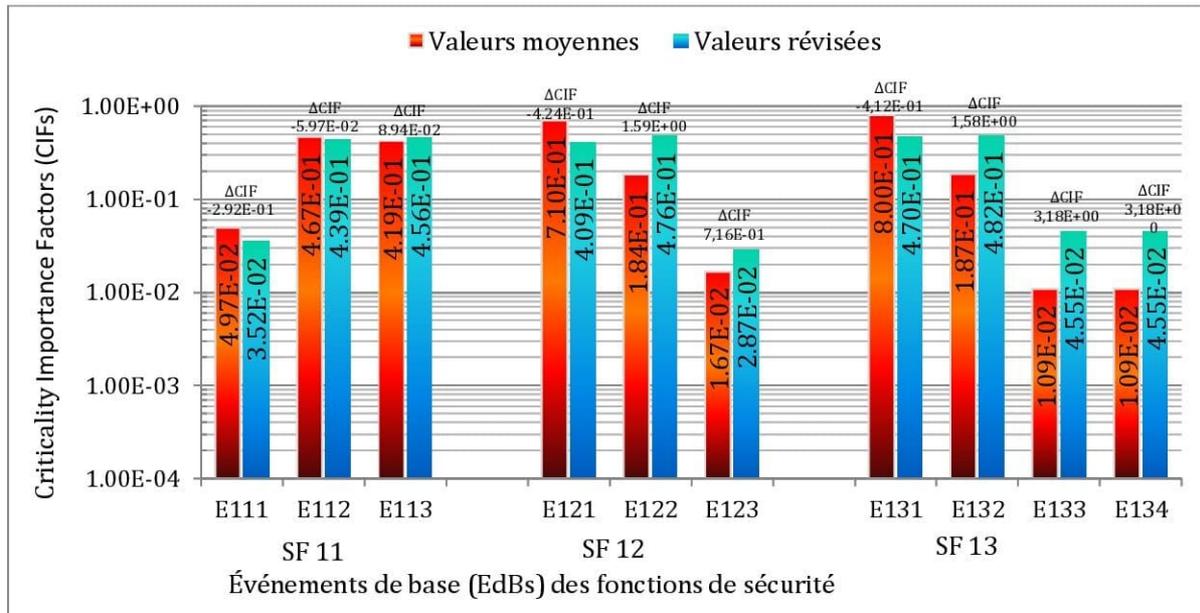


Figure III.11. Valeurs des CIFs et ΔCIFs avant et après révision des événements de base relatifs aux barrières de sécurité. Cas du premier scénario.

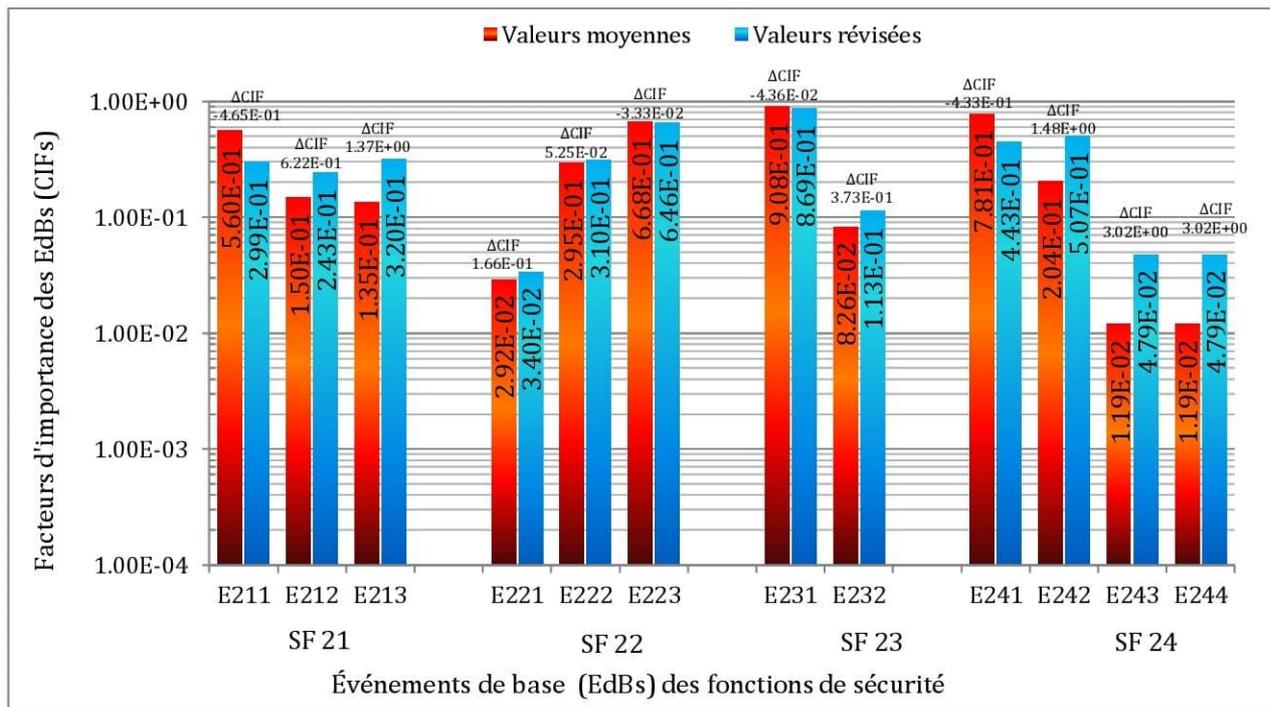


Figure III.12. Valeurs des CIFs et ΔCIFs avant et après révision des événements de base relatifs aux barrières de sécurité. Cas du second scénario.

### III.11 Classement des composants avant et après révision

L'intérêt de cette étape est d'évaluer l'impact des RIFs sur l'ordre des événements de base des barrières de sécurité avant et après révision. Cette évaluation est réalisée en se basant sur les résultats de l'analyse d'importance présentés dans l'étape précédente. Les résultats obtenus pour les deux scénarios sont présentés dans les tableaux III.8 et III.9.

Dans le cas du premier scénario, nous constatons une variation de l'ordre de certains composants des fonctions de sécurité avant et après la révision (Ordre n'est pas maintenu). Notamment, les composants E112, E113 de SF11, les composants E121, E122 de SF12 et les composants E131, E132 de SF13. Ceci peut être interprété par l'impact des estimations des RIFs relatifs aux composants de ces fonctions de sécurité qui ont un MF qui est pratiquement loin de 1.

Tableau III.8. Ordre des événements de base selon leurs CIFs avant et après révision.  
Cas du premier scénario.

Fonction de sécurité: SF11			Fonction de sécurité: SF12			Fonction de sécurité: SF13		
Composant	CIFmoy	CIFrév	Composant	CIFmoy	CIFrév	Composant	CIFmoy	CIFrév
E111	4.97E-02	3.52E-02	E121	7.10E-01	4.09E-01	E131	8.00E-01	4.70E-01
E112	4.67E-01	4.39E-01	E122	1.84E-01	4.76E-01	E132	1.87E-01	4.82E-01
E113	4.19E-01	4.56E-01	E123	1.67E-02	2.87E-02	E133	1.09E-02	4.55E-02
/			/			E134	1.09E-02	4.55E-02
Ordre avant révision: E112>E113>E111			Ordre avant révision: E121>E122>E123			Ordre avant révision: E131> E132>E133=E134		
Ordre après révision: E113>E112 >E111			Ordre après révision: E122>E121>E123			Ordre après révision: E132> E131> E133=E134		

Dans le cas du second scénario, nous constatons uniquement une variation de l'ordre de composants E211, E212, E213 de SF21 qui peut être due à l'impact des estimations des RIFs relatifs aux composants de ces fonctions qui ont un MF qui est pratiquement loin de 1. Pour les fonctions de sécurité SF22 et SF23, aucun changement n'est constaté dans l'ordre de criticité des composants (Ordre maintenu). Ceci peut être interprété par les estimations des statuts des RIFs qui ont des valeurs de MF pratiquement proches de 1.

Tableau III.9. Ordre des événements de base selon leurs CIFs avant et après révision.  
Cas du second scénario.

Fonction de sécurité: SF21			Fonction de sécurité: SF22			Fonction de sécurité: SF23		
Composant	CIFmoy	CIFrév	Composant	CIFmoy	CIFrév	Composant	CIFmoy	CIFrév
E211	5.60E-01	2.99E-01	E221	2.92E-02	3.40E-02	E231	9.08E-01	8.69E-01
E212	1.50E-01	2.43E-01	E222	2.95E-01	3.10E-01	E232	8.26E-02	1.13E-01
E213	1.35E-01	3.20E-01	E223	6.68E-01	6.46E-01	/		
Ordre avant révision : E211>E212 >E213			Ordre avant révision : E223>E222>E221			Ordre avant révision : E231>E232		
Ordre après révision : E213>E211 >E212			Ordre après révision : E223>E222>E221			Ordre après révision : E231>E232		

Fonction de sécurité: SF24		
Composant	CIFmoy	CIFrév
E241	7.81E-01	4.43E-01
E242	2.04E-01	5.07E-01
E243	1.19E-02	4.79E-02
E244	1.19E-02	4.79E-02
Ordre avant révision : E241>E242>E243=E244		
Ordre après révision : E242>E241>E243=E244		

### III.12 Évaluation de l'impact des RIFs sur les CIFs des événements de base

Dans cette étape, nous essayerons d'examiner la force de l'impact des RIFs sur les CIFs des événements de base en utilisant le coefficient de corrélation de Pearson donné par l'équation (II.18) (voir chapitre II, section II.5.4.1). Rappelons que cette analyse de corrélation est effectuée entre deux variables qui sont le facteur modifié '*MF*' qui est la mesure des RIFs influençant les CIFs des événements de base après révision et  $\Delta CIF$  qui est la différence relative entre le *CIF moyen* et le *CIF révisé*. Les tableaux III.10 et III.11 montrent les résultats de cette analyse pour les événements de base des barrières de sécurité.

- Pour le premier scénario, nous pouvons constater à travers les résultats du tableau III.10 que les coefficients de corrélation varient d'une corrélation forte à une corrélation parfaite. Numériquement, nous avons  $r_{xy} = 1$  pour les événements de base des fonctions de sécurité SF11 et du SF12 et  $r_{xy} = 0,96$  pour les événements de base de la fonction de sécurité SF13.
- Pour le second scénario, les mêmes résultats sont obtenus, comme le montre le tableau III.11. Les coefficients de corrélation varient d'une corrélation très forte à une corrélation parfaite. Numériquement, nous avons  $r_{xy} = 1$ , pour les événements de base des fonctions de sécurité SF21, SF22 et SF23 et  $r_{xy} = 0,96$  pour les événements de base de la fonction de sécurité SF24.

Nous remarquons également que pour une même fonction de sécurité, même s'il y a un effet positif des MFs (c'est-à-dire des RIFs) sur certains événements de base et un effet négatif sur d'autres qui impliquent des valeurs respectivement positives et négatives de  $\Delta CIF$ , la corrélation ne diminue pas. Ainsi, quelle que soit la criticité (CIF) des événements de base liés aux défaillances des fonctions de sécurité, elle dépend implicitement des RIFs associés à ces événements de base.

Tableau III.10. Coefficients de corrélation entre MF et  $\Delta CIF$ .  
Cas du premier scénario.

Fonction de sécurité: SF11			Fonction de sécurité: SF12			Fonction de sécurité: SF13		
Composant	MF	$\Delta CIF$	Composant	MF	$\Delta CIF$	Composant	MF	$\Delta CIF$
E111	0.79	-2.92E-01	E121	0.46	-4.24E-01	E131	0.27	-4.12E-01
E112	1.05	-5.97E-02	E122	1.56	1.59E+00	E132	1.17	1.58E+00
E113	1.19	8.94E-02	E123	1.1	7.16E-01	E133	1.37	3.18E+00
$r_{xy}$	<b>1</b>		$r_{xy}$	<b>1</b>		E134	1.37	3.18E+00
/			/			$r_{xy}$	<b>0.96</b>	

Tableau III.11. Coefficients de corrélation entre MF et  $\Delta$ CIF.  
Cas du second scénario.

Fonction de sécurité: SF21			Fonction de sécurité: SF22			Fonction de sécurité: SF23			Fonction de sécurité: SF24		
Composant	MF	$\Delta$ CIF									
E211	0.44	-4.65E-01	E221	1.41	1.66E-01	E231	1.37	-4.36E-02	E241	0.27	-4.33E-01
E212	1.05	6.22E-01	E222	1.27	5.25E-02	E232	2.03	3.73E-01	E242	1.17	1.48E+00
E213	1.46	1.37E+00	E223	1.17	-3.33E-02	$r_{xy}$	1		E243	1.37	1.39E+00
$r_{xy}$	1		$r_{xy}$	1		/			E244	1.37	1.39E+00
/			/			/			$r_{xy}$	0.96	

### III.13 Évaluation de l'impact des RIFs sur les performances des barrières de sécurité

En réexaminant les figures précédentes III.8 et III.9, nous constatons que les RIFs peuvent avoir aussi un impact sur les indisponibilités des barrières de sécurité (PFD). Cet impact peut se traduire soit par l'effet négatif en augmentant les PFD des fonctions de sécurité, soit par un effet positif en diminuant les PFD des fonctions de sécurité. Ceci est dû à l'impact positif ou négatif des RIFs sur les fonctions de sécurité. En outre, par examen de ces résultats, nous constatons qu'il y a une influence faible (positive ou négative) des RIFs sur les indisponibilités des fonctions de sécurité, sauf pour les fonctions de sécurité les plus influencées par les RIFs qui sont SF13 et SF24 où l'ordre de grandeur des probabilités des événements de base E131 et E241 est passé de 1,00E-02 à 1,00E-03. Cela peut s'expliquer par les bonnes pratiques appliquées aux indicateurs de niveau et de pression (bon étalonnage, par exemple), dont la défaillance implique directement des défaillances des fonctions de sûreté (c'est-à-dire des défaillances primaires), comme le montre les figures III.8 et III.9.

### III.14 Évaluation de l'impact des RIFs sur les fréquences des scénarios d'accident

En réexaminant les résultats de la figure III.10, on observe une diminution des deux fréquences des scénarios d'accidents. Dans le cas du premier scénario, la différence est due à la diminution des probabilités de défaillance des fonctions de sécurité SF12 et SF13 après révision, et dans le cas du second scénario, elle est due à la diminution des probabilités de défaillance des fonctions de sécurité SF21 et SF24. Cette diminution peut s'expliquer par l'impact des RIFs sur les fréquences des scénarios après révision des fréquences des événements initiateurs et des probabilités de défaillance des barrières de sécurité.

À noter que la fonction numérique  $Fr_{év}$  de l'équation (II.10) (voir chapitre II, section II.4.7) est une fonction croissante de ses variables (c'est-à-dire la fréquence des événements initiateurs et les probabilités de défaillance). En outre, on constate que l'impact des RIFs ne se limite pas uniquement aux fréquences des événements initiateurs et des probabilités des

événements de base et aux PFDs des barrières de sécurité, mais aussi il s'étale aux fréquences des scénarios d'accidents.

### III.15 Évaluation des scénarios d'accidents

La dernière partie de cette étude concerne l'évaluation des scénarios d'accidents par rapport aux critères d'acceptabilité de la matrice de risque de la figure III.13. En effet, deux sortes d'évaluations des fréquences des scénarios d'accidents sont à considérer dans cette étape : une évaluation avant révision et une autre après révision.

- Avant révision, les fréquences moyennes des deux scénarios sont  $1,32E-04$ /an pour l'incendie et  $1,01E-5$ /an pour l'explosion. Les deux scénarios d'accident sont considérés comme des événements inacceptables car ils sont associés à des niveaux de risque : (occurrence fréquente  $\times$  gravité critique) et (occurrence occasionnelle  $\times$  gravité catastrophique) respectivement.
- Après révision, les fréquences des deux scénarios sont diminuées à  $7,69 E-05$ /an pour l'incendie et à  $1,01E-6$ /an pour l'explosion en gardant les mêmes gravités. En effet, après révision, le premier scénario reste non acceptable et qui nécessite donc une réduction de sa fréquence. Le second scénario est devenu tolérable nécessitant uniquement une surveillance.

En effet, la réduction de la fréquence du premier scénario nécessite d'améliorer la performance des fonctions de sécurité SF11, SF12 et SF33 en réduisant les probabilités révisées de leurs événements de base correspondants (en agissant sur leurs RIFs), selon l'ordre de priorité donné par les CIFrév. Quant au second scénario, il nécessite une surveillance au niveau des fonctions de sécurité, notamment leurs RIFs correspondants.

Il est évident que, du point de vue performance, la SF23 est plus importante que la SF22. Ainsi, plus sa performance est améliorée (en réduisant sa probabilité de défaillance), plus la fréquence de l'explosion est réduite.

Échelle de Fréquence \ Échelle de gravité	Improbable $1E-6 > F$	Rare $1E-6 \leq F < 1E-5$	Occasionnelle $1E-5 \leq F < 1E-4$	Fréquent $1E-4 \leq F < 1E-3$	Très fréquent $1E-3 \leq F$
Négligeable : Blessures superficielles. Dégradation de la capacité de l'installation inférieure à 10 %.					
Marginale : Blessures mineures. Dégradation de la capacité de l'installation inférieure à 50 %.					
Critique : Blessures graves ou un décès et arrêt de l'unité.		$F_{rév}(Explosion)$	$F_{rév}(Incendie)$	$F_{moy}(Incendie)$	$F_{moy}(Explosion)$
Catastrophique : Plusieurs décès. et arrêt de l'usine.					

Figure III.13. Matrice de risque [Sonatrach, 2010].

### **III.16 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons appliqué l'approche proposée (BORA-CIA) à un procédé industriel opérationnel suivant la démarche générale décrite au Chapitre II. Les résultats obtenus à travers l'étude de deux scénarios potentiels (représentatifs) issus d'une analyse de dangers par la méthode HAZOP sont encourageants. En effet, ils nous ont permis de voir l'applicabilité de l'approche BORA-CIA dans différentes étapes à savoir:

L'approche BORA-CIA semble être prometteuse d'un point de vue pratique. Particulièrement, on peut citer résultats suivants:

- Les facteurs opérationnels "RIFs" devraient être intégrés dans l'analyse des risques et dans l'évaluation des performances des barrières de sécurité;
- L'impact des RIFs ne se limite pas uniquement aux fréquences et aux probabilités des événements, mais aussi il s'étale aux fréquences des scénarios d'accidents;
- En considérant l'environnement opérationnel du système via les RIFs, il serait évident que la variabilité de la criticité des événements de base devrait être prise en compte dans l'analyse de la performance des barrières. Ainsi, tout réordonnement des défaillances humaines et/ou des composants aurait un effet important sur les actions d'inspection et de maintenance.
- L'approche proposée peut être un outil d'aide à l'optimisation des tâches d'inspection et de maintenance des barrières de sécurité.
- À l'aide d'une analyse de corrélation, il a été démontré la forte corrélation entre les RIFs et les CIFs des événements de base, bien que les faibles variations des CIFs avant et après révision n'ont pas permis d'avoir un nouveau classement de tous les événements de base.

## **CHAPITRE IV**

# **PROBLÈME D'AGREGATION DES FACTEURS D'INFLUENCE DES RISQUES DANS LA MÉTHODE BORA**

### **IV.1 Introduction**

Parmi les problèmes rencontrés dans le cadre de la méthode BORA, on retrouve le problème d'agrégation des Facteurs d'Influence des Risques (RIFs) et plus précisément, le choix adéquat des opérateurs d'agrégation des scores des RIFs qui dépendent entièrement du contexte industriel et de la nature des scores des RIFs. Le résultat d'agrégation doit refléter le plus fidèlement possible les situations étudiées.

Bien que ce problème est fondamental en matière d'aide à la décision basée sur les résultats fournis par la méthode BORA, il reste à notre connaissance que les travaux et études réalisés sur BORA tels que [Sklet et al., 2004; Sklet et al., 2006; Aven et al., 2006a; Aven et al., 2006b] n'ont pas évoqué cette problématique. En effet, le choix est porté sur la somme pondérée comme opérateur d'agrégation unique utilisé sans définir les critères de son adéquation par rapport aux situations étudiées. Notre objectif alors étant de proposer d'autres alternatives du type ensembliste qui peuvent être appliquées aux cas où la somme pondérée n'est pas adéquate (cas des dépendances des RIFs, dispersion des scores des RIFs,...etc.).

Dans ce chapitre, nous présentons d'abord un aperçu sur les jugements d'experts et les principales familles d'opérateurs d'agrégation multicritère, leurs avantages et limites ainsi que leurs contextes d'application. Puis nous examinons l'agrégation des scores des RIFs par la somme pondérée utilisée par la méthode BORA. Puis nous présentons une étude comparative entre les résultats de cette moyenne pondérée et ceux issus des d'autres opérateurs tels que le maximum pondéré, le minimum pondéré et la méthode OWA et ce, pour palier au problème d'agrégation des RIFs par un choix bien justifié des opérateurs d'agrégation.

## IV.2 Jugement d'experts et agrégation multicritère

Cette partie présente un aperçu théorique, non exhaustif, sur le jugement d'experts et l'agrégation multicritère. À cet effet, nous présentons les différentes approches et opérateurs d'agrégation discutées dans la littérature. Après avoir présenté le principe et les caractéristiques de chaque approche, les modèles mathématiques régissant ces opérateurs sont explorés en détail en montrant leurs applications dans le cadre de BORA.

### IV.2.1 Jugement d'experts

Le jugement d'expert peut être considéré comme une des réponses possibles à un problème technique du retour d'expérience ou d'aide à la décision [AFNOR, 2003]. Il peut compléter ou suppléer les données objectives, lorsque ces dernières sont peu nombreuses ou inadaptées. Il est souvent considéré la seule source d'information disponible dans un processus décisionnel [Lannoy et Procaccia, 2001].

La problématique de jugement d'experts et d'agrégation multicritère est pratiquement posée de manière cruciale dans de nombreux domaines de prise de décision, notamment l'analyse des risques et l'évaluation des performances des barrières de sécurité. En effet, la question centrale est toujours relative, d'une part à la qualité et la fiabilité de l'information et de jugement fournis par les experts [Cooke, 1991]. Et d'autre part, au choix des méthodes de traitement des jugements d'experts et de leur comparaison afin de décider leurs points forts et leurs points faibles, leurs différences et leur adaptation au problème posé.

- *Quant à la qualité et la fiabilité de l'information, le jugement d'expert peut être une alternative incontournable, notamment en absence totale de statistiques ou en présence de statistiques non fiables (cas des événements rares). En même temps cette source peut être considérée comme source d'incertitude.*
- *Quant au problème de choix, la sélection d'une meilleure méthode nécessite une analyse comparative pertinente des données existantes, de leur nature (qualitative ou quantitative) et de leur caractère (conjonctif, de compromis ou disjonctif) ainsi que les résultats obtenus par rapport à des références prédéfinies.*
- *Le recours aux jugements d'experts présente également une difficulté majeure, notamment lorsque les experts ne s'entendent pas sur un problème donné. Pour surmonter cette difficulté, les analystes ont tendance à faire une agrégation des avis d'experts. Or cette agrégation est également une autre source d'incertitude.*

Dans le cadre de BORA, le problème d'agrégation est lié à l'unification des scores des RIFs issus de jugements d'experts. Ce problème, rappelons-le, concerne les scores des RIFs des événements initiateurs et des événements de base (Voir section II.5, Chapitre II).

## IV.2.2 Agrégation multicritère

L'agrégation multicritères est une opération qui consiste à synthétiser des informations exprimant des points de vue d'une certaine différence allant même jusqu'au conflit au sujet d'un même ensemble d'objets. L'agrégation se manifeste dans de nombreuses procédures liées au domaine de l'aide à la décision, à savoir, des classifications, des comparaisons, des évaluations, etc. Son principe consiste à fusionner les différentes informations en une valeur globale et représentative. Dans le cas général, le score agrégé contribue à la prise de décision à partir de situations souvent contradictoires.

Dans la littérature, l'agrégation multicritère est proposée par différentes manières, chacune met l'accent sur certains aspects aux dépends des autres. Par conséquent, chacune a ses avantages et ses limites. Dans cette section, nous présentons les principaux concepts mathématiques liés aux opérateurs d'agrégation [Yager et al, 1997; Marichal, 1998; Detyniecki, 2000; Calvo et al., 2002; Torra and Narukawa, 2007; Beliakov et al., 2008; Grabisch et al., 2009].

### IV.2.2.1 Généralités

En décision multicritères issue de la théorie de l'utilité, on se donne un ensemble de critères  $Cr = \{cr_1, cr_2, cr_3 \dots cr_n\}$  et  $n$  fonctions d'utilité  $u_1, u_2, \dots, u_n$  à valeurs dans  $\mathfrak{R}$ , qui à tout objet  $o$  associent son évaluation  $U_i(o) = (i = 1, 2, \dots, n)$  selon le critère  $Cr_i$ . Le but est de trouver une fonction d'utilité  $Ut$  telle que:

$$(o \succcurlyeq o') \Leftrightarrow (Ut(o) \geq Ut(o')) \quad (IV.1)$$

Une solution simple consiste à poser :

$$Ut(o) = \psi(u_1(o), \dots, u_n(o)) \quad (IV.2)$$

C'est-à-dire que la fonction  $Ut$  se construit par agrégation des fonctions d'utilité monodimensionnelles  $u_i$ , et  $\psi$  est un opérateur d'agrégation ayant pour rôle de combiner les quantités  $u_i(o)$  en une seule quantité. Notons que ce type de modèle, que l'on pourrait appeler décomposable, est induit par une propriété relativement faible d'ordre-séparabilité de la relation de préférence «  $\succcurlyeq$  » [Krantz et al, 1971]. Une solution classique pour  $\psi$  est de prendre la somme pondérée des quantités (appelées aussi scores de l'objet  $o$  sur les différents critères); le score global est la quantité  $Ut(o)$  issue de cette agrégation.

### IV.2.2.2 Opérateurs d'agrégation

Il existe une large panoplie d'opérateurs d'agrégation qui ont fait l'objet de nombreuses recherches et études approfondies [Yager, 1988; Grabisch et al., 2002; Dubois et al., 1997]. Dans ce qui suit, nous contenterons à présenter les plus usuels qui peuvent être classés en deux catégories: compensatoire et non compensatoire, [Hwang et Yoon. 1981].

Les méthodes compensatoires sont basées sur l'hypothèse qu'un score faible d'une alternative donnée qui est obtenu suivant un critère important (préférée) pourrait être compensé par un score élevé d'un autre critère important. Par contre les méthodes non compensatoires (conjonctives et disjonctives) telles que "min" ou "max" sont généralement dominées par un seul critère. i.e. le score meilleur ou le plus faible.

En effet, la famille conjonctive repose sur le principe qu'il existe des niveaux minimums d'acceptation sur chacun des attributs. Cette procédure consiste à écarter les actions qui ne rencontrent pas ces niveaux minimums d'admissibilité ou de passage. En revanche, la famille disjonctive consiste à sélectionner les actions qui ont les évaluations les plus élevées sur n'importe lequel des attributs. La procédure disjonctive sert à retenir les actions qui ont des performances exceptionnelles sur certains critères. Un des inconvénients de cette famille d'opérateurs est qu'une grande partie des scores sont ignorés dans le processus final d'agrégation [Hwang et Yoon, 1981]. Une autre famille d'opérateurs amplement étudiée dans littérature concerne les moyennes ordonnées [Yager, 1988]. Ces opérateurs ne sont en effet, qu'une intersection des deux opérateurs "min" et "max" classiques. Ainsi, les opérateurs t-norm et t-conorm [Schweizer et Sklar, 1983; Menger, 1942] ont été introduit pour généraliser les deux opérateurs conjonctifs ("Et") disjonctifs ("Ou").

Nous nous limitons à présenter et appliquer les opérateurs d'agrégation pondérées les plus proches du contexte de la méthode BORA en précisant leurs propriétés mathématiques essentielles et ce, dans le but d'évaluer si au moins certains d'entre eux pourraient offrir des avantages comparativement à la somme pondérée utilisée dans le cadre de BORA conventionnelle.

#### A) Opérateurs conjonctifs

Les opérateurs conjonctifs utilisent une agrégation de type "et" logique. Ainsi, le résultat de ce type d'agrégation tend vers la valeur extrême (1 si l'agrégation est définie sur [0, 1]) si et seulement si les quantités à agréger ont la même tendance (quantités élevées). Une propriété naturelle est alors d'imposer:

$$\Psi(1, a) = a, \forall a \in [0,1] \quad (IV.3)$$

Si on rajoute à  $\Psi$  les propriétés de non-décroissance, neutralité et associativité, on obtient la famille des normes triangulaires ou t-normes, notées  $T$  et vérifiant les deux propriétés suivantes :

$$T(0, a) = 0, \forall a \in [0,1] \quad (IV.4)$$

- i) L'opérateur minimum, noté  $\wedge$ , est la plus grande t-norme, i.e.  $T(a, b) \leq (a \wedge b)$ .

### B) Opérateurs disjonctifs

Les opérateurs disjonctifs quant à eux, utilisent une agrégation de type "ou" logique. Par conséquent, pour que le résultat de ce type d'agrégation tend vers la valeur extrême (1 si l'intervalle de définition est  $[0, 1]$ ), il suffit que l'une des quantités à agréger a la même tendance. Ceci peut se traduire par la propriété suivante:

$$\Psi(0, a) = a, \forall a \in [0,1] \quad (IV.5)$$

Si on rajoute à  $\Psi$  les propriétés de non-décroissance, neutralité et associativité, on obtient la famille des co-normes triangulaires ou t-conormes, notées  $S$  et ayant les deux propriétés suivantes:

$$S(1, a) = 1, \forall a \in [0,1] \quad (IV.6)$$

ii) L'opérateur maximum est la plus petite t-conorme, i.e.  $S(a, b) \geq (a \vee b)$ .

### C) Le Minimum et le Maximum pondérées

Le minimum et le maximum pondérés appartiennent respectivement aux familles des opérateurs conjonctifs et disjonctifs et sont les plus utilisés dans les études pratiques. Nous donnons ci-dessous leurs définitions respectives et leurs principales propriétés.

Soit un jeu de poids  $w_1, w_2, \dots, w_n$  dans  $[0, 1]$  avec au moins un  $w_i$  égal à 1. En notant respectivement  $\wedge$  et  $\vee$  les opérateurs min et max. On définit le minimum et le maximum pondérés par:

$$w \min_{w_1, \dots, w_n} (a_1, \dots, a_n) = \bigwedge_{i=1}^n ((1 - w_i) \vee a_i) \quad (IV.7)$$

$$w \max_{w_1, \dots, w_n} (a_1, \dots, a_n) = \bigvee_{i=1}^n (w_i \wedge a_i) \quad (IV.8)$$

La méthode du min-max est utilisée pour choisir une action qui vérifie l'expression (IV.7). Elle cherche à sélectionner le minimum des évaluations maximums (selon les attributs). La force d'une chaîne correspond à celle de son maillon le plus faible. D'où, Le min-max est approprié dans le cas où le décideur a une attitude optimiste.

La méthode du max-min est utilisée pour choisir une action qui vérifie l'expression (IV.8). Elle cherche à sélectionner le maximum des évaluations minimums (selon les attributs). La force d'une chaîne correspond à celle de son maillon le plus fort. Le max-min est appropriée dans le cas où le décideur a une attitude pessimiste.

Intuitivement, la pondération du minimum (resp. le maximum) permet de limiter l'impact d'un score faible (resp. élevé) obtenu par un critère qui n'a pas une force de veto importante (resp. qui n'est pas d'une importance primordiale). L'examen de la définition de  $wmin$  et  $wmax$  nous conduit aux interprétations suivantes:

- Pour le minimum pondéré, le score global est bon si et seulement si tous les critères importants sont satisfaits. Un critère important non satisfait ne peut être compensé par un bon score sur un autre critère, même important. Un critère peu important n'aura pas un impact dans le résultat final.
- Pour le maximum pondéré, le score global est mauvais si et seulement si tous les critères importants sont mal satisfaits. Un seul critère important satisfait suffit à donner un score global élevé.

Il importe de noter que ces deux opérateurs sont non-compensatoires. De plus, ils exigent que les échelles de mesure des différents critères soient commensurables. Une façon qui consiste à normaliser les différentes évaluations.

La particularité du minimum pondéré est de favoriser les alternatives dont tous les critères importants ayant une bonne performance tandis que le maximum pondéré favorise les alternatives dont le critère le plus important à une bonne performance quelles que soient les performances des autres critères. En vue d'éclaircir leur applicabilité, nous donnons ci-après quelques exemples illustratifs.

**Exemples:**

- On considère 4 critères:  $x_1, x_2, x_3, x_4$ , de scores respectifs  $a_1=0.5, a_2=0.8, a_3=0.7, a_4=0.2$ , et de poids  $w_1=0.7, w_2=1, w_3=1, w_4=0.4$ . Alors:  $W_{min} = (0.5 \vee 0.3) \wedge (0.8 \vee 0) \wedge (0.7 \vee 0) \wedge (0.2 \vee 0.6) = 0.5$ ; Ainsi, le médiocre score correspondant au critère  $x_4$  n'a pas d'effet dramatique sur le score global en raison de la force de veto du critère.

- Prenons les 4 critères :  $x_1, x_2, x_3, x_4$ , avec les scores  $a_1=1, a_2=0.3, a_3=0.2, a_4=0.3$ , et les poids,  $w_2=w_3=1, w_4=0.2$ . Alors:  $w_{max} = (1 \wedge 0.5) \vee (0.3 \wedge 1) \vee (0.2 \wedge 1) \vee (0.3 \wedge 0.2) = 0.5$  ; Ainsi, le critère  $x_1$  avec un score maximal est pris en considération mais sans que sa contribution au score global puisse excéder son importance, c'est-à-dire 0.5.

- Prenons les deux alternatives  $a$  et  $b$  caractérisées respectivement par les scores ( $a_1=0, a_2=0.5, a_3=1$ ) et ( $b_1=0.7, b_2=0.7, b_3=0.65$ ) et les poids  $w_1=0.25, w_2=0.3, w_3=0.45$ . On obtient alors  $W_{min}(a)=0.7 > W_{min}(b)=0.5$ , ce qui signifie que l'alternative  $a$  a une excellente performance sur le critère le plus important ce qui n'est pas le cas de  $b$  bien que toutes ces performances soient bonnes.

- Prenons les deux alternatives  $c$  et  $d$  caractérisées respectivement par les scores ( $c_1=0.3, c_2=0.4, c_3=0.5$ ), ( $d_1=1, d_2=1, d_3=0.4$ ). On obtient,  $W_{max}(c)=0.5 > W_{max}(d) = 0.4$ .

Ceci signifie que l'alternative  $c$  a une meilleure performance que  $d$  sur le critère le plus important, bien que les performances de  $d$  soient excellentes sur les deux premiers critères.

### D) Opérateurs de compromis

Ces opérateurs se situent entre les opérateurs disjonctifs et conjonctifs. Ils utilisent une agrégation moyenne dite compensatoire et donnent en cas de combinaison de scores élevés et faibles un score intermédiaire compris entre le maximum et le minimum.

La somme pondérée est la fonction la plus représentative de la famille d'opérateurs compensatoires [Kolmogorov, 1930; Aczel, 1948]. L'idée fondamentale de cette fonction d'agrégation consiste à déterminer une solution équitable ou de compromis entre les attributs. Cette méthode, qui est pratiquement appliquée dans divers études [Vvincke, 1989; haugen et al., 2006], est préconisée lorsque les critères représentent les différentes facettes d'une même caractéristique globale, exprimées dans les mêmes unités et totalement compensatoires (non dispersées). La somme pondérée est l'exemple de moyenne la plus utilisée dans la pratique. Il existe aussi des moyennes géométriques et harmoniques qui sont en fait des cas particuliers des moyennes généralisées:

$$M_{w_1, \dots, w_n} (a_1, \dots, a_n) = \left( \sum_{i=1}^n w_i a_i^z \right)^{1/z} \quad (IV.9)$$

Où  $z$  est un entier relatif ( $z \in Z = \{\dots, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, \dots\}$ ) et  $\sum_{i=1}^n w_i = 1$ . En posant  $z = 1$ ,

On obtient la somme pondérée qui associe un poids différent à chaque critère, la somme de ces pondérations étant égale à 1. Le calcul de la moyenne pondérée est donné par :

$$M_{w_1, \dots, w_n} (a_1, \dots, a_n) = \sum_{i=1}^n w_i a_i \quad (IV.10)$$

Cette somme est la seule moyenne généralisée qui soit invariante au changement d'échelle affine. La moyenne arithmétique se déduit de (ii.10) pour des poids  $w_i = (i = 1, 2, \dots, n)$  égaux, soit :

$$M (a_1, \dots, a_n) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_i \quad (IV.11)$$

Cette moyenne joue le rôle de représentante des  $(a_i)$  et est considérée comme la valeur qu'auraient ces  $a_i$  si elles étaient toutes égales. En fait, les  $(a_i)$  les plus élevés compensent les  $a_i$  les moins élevés.

Par ailleurs, ce caractère compensatoire aura un effet de masque sur l'aspect conflictuel et incommensurable des attributs. À noter aussi qu'elle est recommandée surtout lorsque l'indépendance au sens des préférences entre les attributs est vérifiée, condition suffisante pour qu'une fonction de valeur puisse se décomposer en une forme additive.

**Exemple :**

Considérons les 4 critères:  $x_1, x_2, x_3, x_4$  de scores respectifs  $a_1=3, a_2=7, a_3=2, a_4=6$  ayant les poids  $w_1=0.1, w_2=0.2, w_3=0.9$  et  $w_4=1$ . Alors, la somme pondérée donne:  $M(w, a) = 3 \times 0.1 + 7 \times 0.2 + 2 \times 0.9 + 6 \times 1 = 9.5$ .

**E) Moyenne pondérée ordonnée (OWA)**

La moyenne pondérée ordonnée (OWA: Ordered Weighted Averaging) est une classe d'opérateurs d'agrégation qui détermine le poids de critère en fonction de son degré de satisfaction à la différence de la somme pondérée où le poids dépend de la nature du critère. Cette catégorie intéressante d'opérateurs d'agrégation a été introduite par [Yager, 1988], [Yager and Kacprzyk, 1997; Filev and Yager, 1998].

La méthode OWA consiste à récupérer pour chaque ensemble d'alternatives l'ensemble des scores ( $a_i$ ) (performances ou aussi utilités), les trier par ordre décroissant et les unifier en calculant une somme pondérée de ces scores par des coefficients prédéfinis [Torra, 1997].

Soit un jeu de poids  $w = (w_1, w_2, \dots, w_n)$  tel que  $\sum_{i=1}^n w_i = 1$ . Les scores sont classés par ordre décroissant de façon à obtenir  $n$  scores  $b_j$  tel que  $b_j$  est le  $j$ ème plus grand élément des  $a_i$ . L'agrégation s'écrit alors:

$$OWA(a_1, \dots, a_n) = \sum_{i=1}^n w_j \cdot b_j \tag{IV.12}$$

Cet opérateur possède la particularité de généraliser un certain nombre d'opérateurs à savoir: le minimum, le maximum et la moyenne arithmétique:

- le minimum si  $w_n=1$  et  $w_j=0$  pour  $j \neq n$ ,
- le maximum si  $w_1=1$  et  $w_j=0$  pour  $j \neq 1$ ,
- la médiane si pour  $n$  impair.  $w_{(n+1)/2}=1$  et  $w_j=0$  pour  $j \neq (n+1)/2$ ,
- la moyenne arithmétique, avec  $w_j = 1/n, \forall j$ .

Il importe aussi de noter que les OWA ont un pouvoir de représentation assez étendu. Son principal intérêt est de pouvoir exprimer des quantificateurs vagues comme dans l'exemple suivant: «Au moins quelques critères doivent être satisfaits», ce qui pourra se modéliser par exemple, lorsque  $n=5$ , par  $w = (0, 0.1, 0.2, 0.4, 0.4)$ .

**Exemple:**

Prenons les vecteurs  $a = (3, 7, 2, 6)$  et  $w=(0, 0.2, 0.9, 1)$ . En réordonnant les composantes de  $a$ . on a :  $b_1=7, b_2=6, b_3=3, b_4=2$ . D'où:

$$OWA(3, 7, 2, 6) = 0 \times 7 + 0.2 \times 6 + 0.9 \times 3 + 1 \times 2 = 5.9$$

Notons que la somme pondérée donne:  $M(w, a) = 0 \times 3 + 0.2 \times 7 + 0.9 \times 2 + 1 \times 6 = 9.2$

### IV.3 Jugements d'experts et agrégation multicritères dans la méthode BORA

Comme nous l'avons vu dans les chapitres II et III, les jugements d'experts occupent une place prépondérante dans la méthode BORA. Son importance apparaît dans toutes ses étapes. Les parties de BORA dans lesquelles les jugements d'experts interviennent sont principalement :

- Proposition d'une échelle de notation développée par les experts eux-mêmes (voir le tableau II.2);
- Estimation des fréquences des événements initiateurs et des probabilités des événements de base sous forme d'intervalles de confiance;
- Attribution des poids  $w_i$  et des scores  $Q_i$  aux RIFs associés à ces événements.

#### IV.3.1 Problématique d'agrégation multicritère dans la méthode BORA

Dans la méthode BORA, l'agrégation multicritère par la moyenne pondérée constitue une source d'incertitudes. En effet, au-delà de la qualité de jugement d'experts affectés par des incertitudes essentiellement épistémiques, les opérateurs d'agrégation des facteurs des risques (RIFs) doivent faire l'objet d'une étude d'applicabilité préalable, seulement les résultats issus cette l'agrégation vont influencer la prise de décision en matière de maîtrise des risques.

À notre connaissance, dans toutes les applications de BORA [Haugen et al., 2010; Vinnem et al., 2008; Rausand, 2011; Haugen et al., 2010; Duijm, 2008; Sklet et al., 2004 ; Youngjung et al., 2009], l'agrégation consiste à synthétiser les valeurs normalisées des scores des différents RIFs dans une valeur globale appelée Facteur Modifiant (MF). Cette agrégation est réalisée moyennant la somme pondérée. À ce niveau, l'utilisation de cet opérateur linéaire d'agrégation pose problème dans des situations où les facteurs de risque sont dépendants (inclusion des uns dans les autres) ou en présence d'une dispersion entre les scores de ces facteurs. Dans ce cas, le résultat d'agrégation par un modèle compensatoire ne reflète pas fidèlement les conditions opérationnelles des barrières de sécurité.

#### IV.3.2 Critères de choix des opérateurs d'agrégation dans la méthode BORA

La comparaison des opérateurs d'agrégation à partir de leurs résultats est souvent rendue difficile à cause du manque de précision d'une part, et d'autre part, des incertitudes qui entachent les modèles d'agrégation. Pour pallier à cette difficulté, on procède par l'examen d'un certain nombre de critères permettant de comparer les opérateurs entre eux. L'ensemble des critères doit répondre à des exigences d'exhaustivité, de cohésion, de non redondance, de continuité, de l'unanimité, de l'invariance et de monotonie (voir annexe B).

De surcroît, l'évaluation des opérateurs se fait pour chaque critère. Dans ce contexte, une matrice de performance qui présente les résultats de cette évaluation sur chaque critère donne une vue de l'ensemble des actions. Ainsi, l'étape de la modélisation des préférences du décideur peut être subdivisée en deux étapes: la première étape consiste à construire la

famille de critères, la seconde consiste à établir une matrice de performance (Grabisch et al., 2009).

Dans le cadre de BORA, les critères de choix se résument en:

- L'état des scores d'un RIF (Dispersion / non dispersion des scores) ;
- L'interaction et dépendance entre les RIFs qui constituent une contrainte réelle dans les situations réelles;
- Les considérations spécifiques de l'étude: objectifs, hypothèses, nature des données (quantitatives/ qualitatives).

#### IV.4 PLAN DE COMPARAISON DES OPÉRATEURS D'AGREGATION DANS BORA

Dans cette partie, nous proposons un plan de comparaison des modèles d'agrégation présentés dans la section IV.2.2.2 et ce, dans le but d'étudier leur applicabilité dans le cadre de la méthode BORA. Les résultats issus de la moyenne pondérée seront notre point de repère dans cette étude. Il importe de noter que la finalité de cette comparaison n'étant pas la remise en cause de la moyenne pondérée, mais plutôt d'examiner le degré de fidélité de chaque modèle selon les conditions de fonctionnement et d'exploitation du système industriel. En outre, voir s'il y'a lieu d'améliorer la méthode BORA en suggérant en plus de la moyenne pondérée, d'autres alternatives pouvant être mieux adaptées et plus adéquates dans certaines situations.

Les principales étapes de notre plan de comparaison sont :

##### ***IV.4.1 Première étape: Détermination des fréquences des événements initiateurs et des probabilités des événements de base par les différents modèles d'agrégation***

Cette étape consiste à appliquer la moyenne pondérée t'elle qu'elle est appliquée dans la méthode BORA conventionnelle puis les opérateurs Max-Min, Min-Max et OWA au calcul des fréquences des événements initiateurs et des probabilités des événements de base. Les résultats obtenus par la moyenne pondérée serviront de référence par rapport à ceux obtenus par les autres opérateurs d'agrégation. Pour la moyenne pondérée, on se réfère aux équations (II.7) et (II.8) du chapitre II. Les équations permettant de calculer les fréquences et les probabilités révisées par les opérateurs Max-Min, Min-Max et OWA sont basées sur les équations (IV.7), (IV.8) et (IV.12) et sont présentées dans ce qui suit :

##### ***IV.4.1.1 Agrégation par le minimum pondéré***

La probabilité révisée d'un événement  $e$ ,  $P_{rév}(e)$ , calculée moyennant cet opérateur est définie par l'équation suivante:

$$P_{rév_{min}}(e) = P_{moy} \cdot \bigwedge_{i=1}^n \left( (1 - w_i) \vee Q_i \right) \quad (IV.13)$$

Où  $P_{rév_{min}}(e)$  est la probabilité révisée,  $MF_e = \bigwedge_{i=1}^n \left( (1 - w_i) \vee Q_i \right)$  est le facteur modifiant calculé par le minimum pondérée des  $Q_i$ , i.e. c'est la combinaison non linéaire des couples

$(Q_i, W_i)$  en considérant  $n$  RIFs associés à un événement  $e$  donné,  $P_{ave}$  est la probabilité moyenne,  $w_i$  et  $Q_i$  représentent respectivement le poids (importance) et le score du RIF $_i$ .

Dans le cadre de la méthode BORA, ce type de pondération permet de limiter l'impact des scores élevés assignés aux RIFs qui ont une force de veto dans leur contribution au score global (MF).

#### IV.4.1.2 Agrégation par le Maximum pondéré

La probabilité révisée d'un événement  $e$ ,  $P_{rév}(e)$ , calculée moyennant cet opérateur est définie par l'équation suivante:

$$P_{rév_{max}}(e) = P_{moy} \cdot \bigvee_{i=1}^n (w_i \wedge Q_i) \quad (IV.14)$$

Où  $P_{rév_{max}}(e)$  est la probabilité révisée,  $MF = \bigvee_{i=1}^n (w_i \wedge Q_i)$  est le facteur modifiant calculé par le maximum pondérée des  $Q_i$ , i.e. c'est la combinaison non linéaire des couples  $(Q_i, W_i)$  de  $n$  RIFs associés à un événement  $e$  donné.

Ce type de pondération permet de limiter l'impact d'un score faible d'un RIF, i.e. le RIF ayant un score faible est pris en considération mais sans que sa contribution au facteur modifiant (MF) puisse excéder son importance.

#### IV.4.1.3 Agrégation par moyenne pondérée ordonnée (OWA)

La probabilité révisée d'un événement  $e$ ,  $P_{rév}(e)$ , calculée moyennant cet opérateur est définie par l'équation suivante:

$$P_{rév_{OWA}}(e) = P_{moy} \cdot \sum_{j=1}^n b_j \cdot w_j \quad (IV.15)$$

Où  $P_{rév_{OWA}}(e)$  est la probabilité révisée,  $MF = \sum_{j=1}^n b_j \cdot w_j$  est le facteur modifiant calculé par le moyenne pondérée ordonnée des scores  $b_j$ , i.e. c'est la combinaison des couples  $(b_j, w_j)$  de RIF associés à un événement de base  $e$  donné,  $b_j$  étant les nouveaux scores des  $n$  scores  $(Q_i)$  des RIFs classés par ordre décroissant.

Ce type de pondération permet de pondérer les scores des RIFs en fonction de leur rang lorsque ceux-ci sont ordonnés selon l'ordre décroissant. Sa tendance centralisée peut donner plus d'importance soit aux scores faibles, soit aux scores élevés, et en même temps d'être moins sensible aux valeurs extrêmes.

#### IV.4.2 Deuxième étape : Détermination des probabilités de défaillance des barrières de sécurité par les différents modèles d'agrégation des facteurs de risque

Sur la base des résultats de la première étape, on déterminera les performances probabilistes en terme de probabilité de défaillance des différentes barrières de sécurité.

Le but étant d'analyser l'effet des différents opérateurs d'agrégation sur le niveau « barrières de sécurité », comme étant le premier niveau de propagation des incertitudes générées par les modèles d'agrégation appliqués. La validation des différents résultats nécessite une analyse des scores des RIFs.

#### IV.4.3 Troisième étape : Détermination des fréquences des accidents par les différents modèles d'agrégation des facteurs de risque

C'est le dernier niveau de propagation des incertitudes issues des différents modèles d'agrégation. C'est à ce niveau qu'on va réellement estimer l'impact de ces différentes agrégations par la variabilité des fréquences révisées des événements initiateurs et des probabilités de défaillance des barrières de sécurité.

### IV.5 ETUDE DE CAS : APPLICATION AU SYSTEME « SEPARATEUR DE GAZ » (Voir Chapitre III)

#### IV.5.1 Variation des fréquences et probabilités des événements en fonction du modèle d'agrégation

##### A) Présentation des résultats

Nous allons reprendre les résultats de référence issus de l'application de la méthode BORA-CIA (voir tableaux III.6, III.7 du chapitre III). Rappelons que les fréquences et les probabilités révisées des événements initiateurs et de base, calculées à l'aide de l'équation (II.8), laquelle est basée sur la moyenne pondérée (Equation (II.7)), serviront de références dans notre plan de comparaison, car ayant fait l'objet de l'étude de cas présentée dans le chapitre III. Les résultats obtenus par les différents modèles d'agrégation dans le cas des deux scénarios sont regroupés dans les tableaux IV.1 et IV.2 et représentés graphiquement par les figures IV.1 et IV.2.

Tableau IV.1. Fréquences/probabilités moyennes et révisées obtenues par les différents opérateurs d'agrégation. Cas du premier scénario.

Fréquence/probabilité		Valeurs moyennes	Fréquences et probabilités révisées			
			Méthode MP	Méthode Max	Méthode Min	Méthode OWA
Fonctions de sécurité						
Evt initiateur IE1	IE1	1.00E-01	1.58E-01	5.00E-02	8.33E-02	1.02E-01
Fonction de sécurité SF11	E111	1.30E-02	1.03E-02	6.50E-03	9.75E-03	1.03E-02
	E112	1.10E-01	1.15E-01	4.00E-02	8.25E-02	1.15E-01
	E113	1.00E-01	1.19E-01	4.44E-02	7.78E-02	9.08E-02
Fonction de sécurité SF12	E121	3.00E-01	1.37E-01	1.33E-01	1.80E-01	1.23E-01
	E122	1.00E-01	1.56E-01	5.00E-02	1.00E-01	1.76E-01
	E123	1.00E-02	1.10E-02	5.00E-03	7.50E-03	1.03E-02
Fonction de sécurité SF13	E131	1.34E-02	3.60E-03	4.42E-03	6.70E-03	4.20E-03
	E132	3.16E-03	3.69E-03	1.13E-03	2.12E-03	4.51E-03
	E133	1.36E-02	1.87E-02	4.95E-03	9.89E-03	1.50E-02
	E134	1.36E-02	1.87E-02	4.95E-03	9.89E-03	1.50E-02

Tableau IV.2. Fréquences/probabilités moyennes et révisées obtenues par les différents opérateurs d'agrégation. Cas du second scénario.

Fréquence/probabilité		Valeurs moyennes	Fréquences et probabilités révisées			
			Méthode MP	Méthode Max	Méthode Min	Méthode OWA
<b>Evt initiateur IE2</b>	<b>EI2</b>	1.30E-01	1.97E-01	6.50E-02	9.75E-02	1.32E-01
<b>Fonction de sécurité SF21</b>	<b>E111</b>	3.16E-01	1.38E-01	1.58E-01	1.74E-01	1.38E-01
	<b>E112</b>	1.10E-01	1.15E-01	4.00E-02	7.37E-02	1.18E-01
	<b>E113</b>	1.00E-01	1.46E-01	4.44E-02	7.78E-02	9.63E-02
<b>Fonction de sécurité SF22</b>	<b>E221</b>	1.00E-03	1.41E-03	5.71E-04	7.14E-04	1.31E-03
	<b>E222</b>	1.00E-02	1.27E-02	5.00E-03	1.00E-02	1.67E-02
	<b>E223</b>	2.24E-02	2.61E-02	1.12E-02	1.87E-02	2.24E-02
<b>Fonction de sécurité SF23</b>	<b>E231</b>	1.00E-01	1.37E-01	4.44E-02	7.50E-02	2.05E-01
	<b>E232</b>	1.00E-02	2.03E-02	5.00E-03	2.33E-02	4.06E-02
<b>Fonction de sécurité SF24</b>	<b>E241</b>	1.20E-02	3.23E-03	4.50E-03	6.00E-03	3.23E-03
	<b>E242</b>	3.16E-03	3.69E-03	1.13E-03	2.12E-03	4.22E-03
	<b>E243</b>	1.36E-02	1.87E-02	4.95E-03	9.89E-03	1.50E-02
	<b>E244</b>	1.36E-02	1.87E-02	4.95E-03	9.89E-03	1.50E-02

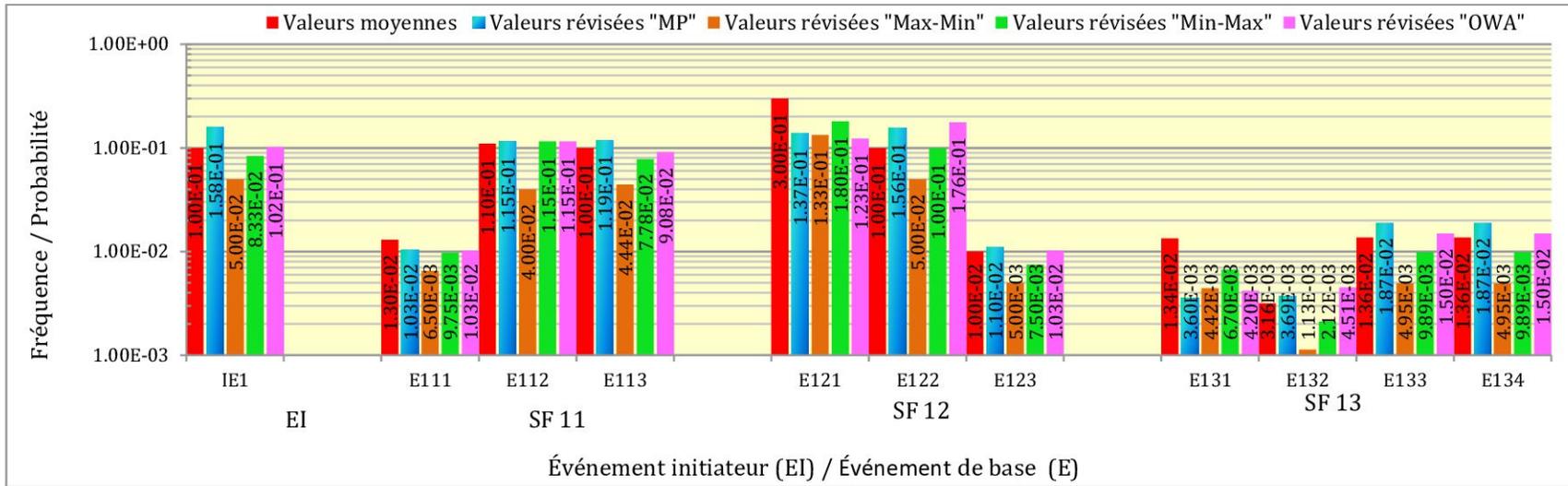


Figure IV.1. Variation des fréquences et probabilités des événements initiateurs et de base avant et après révision. Cas du premier scénario.

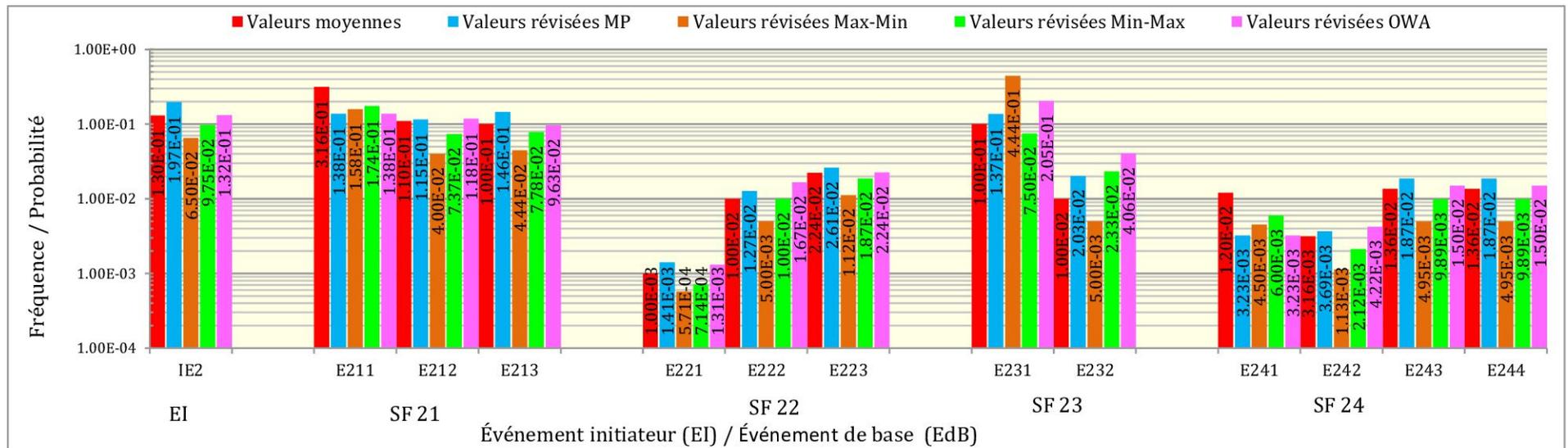


Figure IV.2. Variation des fréquences et probabilités des événements initiateurs et de base avant et après révision. Cas du second scénario.

## B) Discussion des Résultats

En examinant les résultats des figures IV.1 et IV.2, on remarque une différence dans des fréquences et les probabilités révisées des événements initiateurs et de base obtenues par les différents opérateurs d'agrégation.

En considérant les fréquences et les probabilités révisées issues de la moyenne pondérée comme valeurs de référence, on peut constater qu'à l'exception de l'événement de base E241 pour les deux scénarios, les valeurs obtenues par l'opérateur OWA sont proches de celles de la moyenne pondérée avec le même ordre de grandeur (pratiquement la même puissance de 10). Ceci peut être interprété par la tendance centrale des deux opérateurs d'agrégation.

Pour les résultats obtenus par les opérateurs d'agrégation « maximum » et « minimum » pondérés, les valeurs obtenues sont un peu différentes par rapport à celles de la moyenne pondérée avec une différence de l'ordre de 10 entre les valeurs obtenues.

Les résultats ci-dessus sont aussi valables pour le cas des fréquences des événements initiateurs EI1 et EI2.

### IV.5.2 Variation des PFD des barrières de sécurité en fonction du modèle d'agrégation

Le tableau IV.3 regroupe les valeurs des PFDs moyennes et révisées des barrières de sécurité obtenues par les différents modèles d'agrégation dans le cas des deux scénarios. Rappelons que la détermination de la PFD des différentes barrières est basée sur la quantification des arbres de défaillances du chapitre III, en utilisant les probabilités moyennes et révisées des événements de base. Les figures IV.3 et IV.4 montrent respectivement la variation des PFDs des barrières du premier et du second scénario.

Tableau IV.3. PFDs moyennes et révisées obtenues par différents opérateurs d'agrégation. Cas de deux scénarios.

Fréquences Fonctions de sécurité		PFD moyenne	PFDs révisées			
		Valeurs moyennes	Méthode MP	Méthode Max	Méthode Min	Méthode OWA
Premier scénario incendie	SF11	2.09E-01	2.28E-01	8.86E-02	1.92E-01	2.04E-01
	SF12	3.76E-01	2.80E-01	1.81E-01	2.68E-01	2.85E-01
	SF13	1.67E-02	7.62E-03	5.57E-03	8.90E-03	8.91E-03
Second scénario Explosion	SF21	4.52E-01	3.49E-01	2.28E-01	3.71E-01	3.13E-01
	SF22	3.31E-02	3.98E-02	1.67E-02	2.89E-02	4.00E-02
	SF23	1.09E-01	1.55E-01	4.92E-02	9.66E-02	2.37E-01
	SF24	1.53E-02	7.26E-03	5.65E-03	8.20E-03	7.66E-03

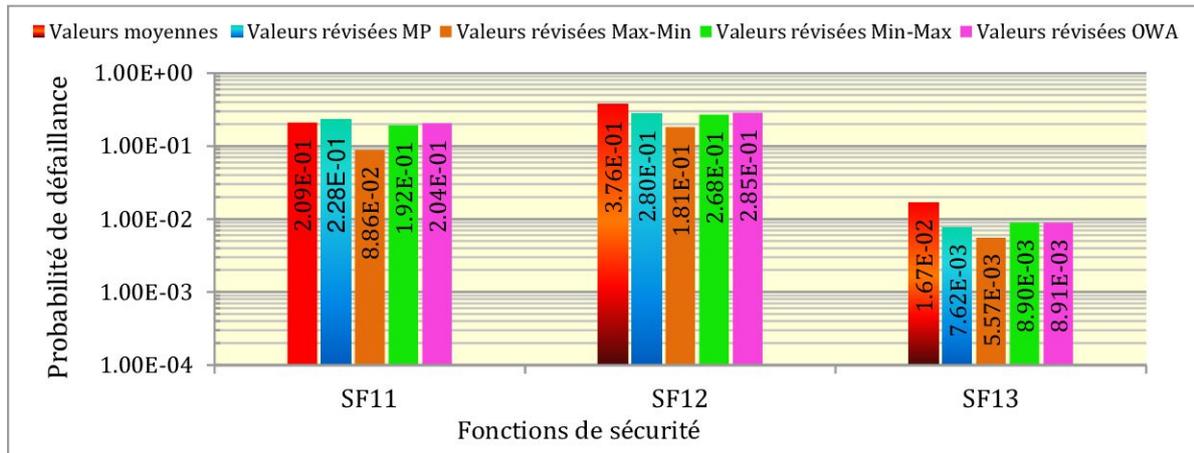


Figure IV.3. Variation des PFD moyennes et révisées des barrières de sécurité obtenues par différents opérateurs d'agrégation. Cas du premier scénario.

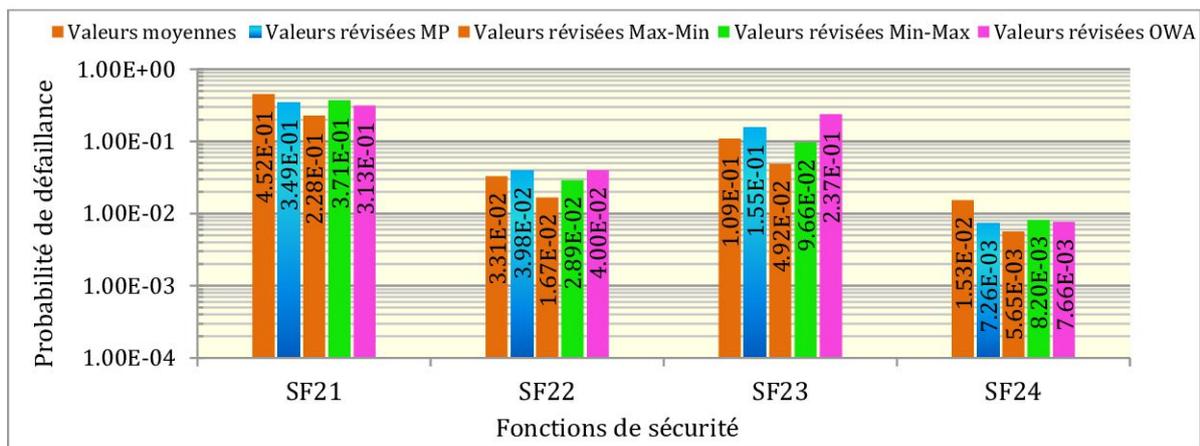


Figure IV.4. Variation des PFD moyennes et révisées des barrières de sécurité obtenues par différents opérateurs d'agrégation. Cas du second scénario.

### ➤ Discussion des résultats

D'après les figures IV.3 et IV.4, nous remarquons pour les deux scénarios que les valeurs obtenues par l'opérateur OWA sont proches de celles de la moyenne pondérée avec le même ordre de grandeur. Ceci est dû aux probabilités des événements de base issues de ces deux modèles qui sont légèrement différentes, comme mentionné précédemment dans les figures IV.1 et IV.2.

Par contre, en comparant les résultats obtenus par les opérateurs d'agrégation « maximum » et « minimum » pondérés avec ceux issus de la moyenne pondérée, on constate qu'ils sont différents avec une différence d'ordre 10. Ce résultat était bien constaté avec les probabilités des événements de base des fonctions de sécurité SF11, SF23.

Cette différence est significative si l'on considère les niveaux de confiance normalisés des barrières lesquels sont basés sur un facteur de 10.

### IV.5.3 Variation des fréquences des scénarios d'accidents en fonction des modèles d'agrégation

Le tableau IV.4 montre les fréquences moyennes et révisées des scénarios d'accidents calculées par les différents modèles d'agrégation des RIFs. La détermination de ces fréquences est basée sur les équations (II.1) et (II.10) du chapitre II. La figure IV.5 montre la représentation graphique des fréquences des deux scénarios en fonction du modèle d'agrégation utilisé.

Tableau IV.4. Fréquences moyennes et révisées des scénarios d'accidents obtenues par différents opérateurs d'agrégation. Cas de deux scénarios.

Fréquences Scénario d'accident	Fréquence moyenne	Fréquences révisées des scénarios d'accidents			
	Valeurs moyennes	Méthode MP	Méthode Max	Méthode Min	Méthode OWA
Premier scénario Incendie	1.31E-04	7.69E-05	4.45E-06	3.81E-05	5.28E-05
Second Scénario Explosion	3.24E-06	3.08E-06	6.87E-08	8.28E-07	3.00E-06

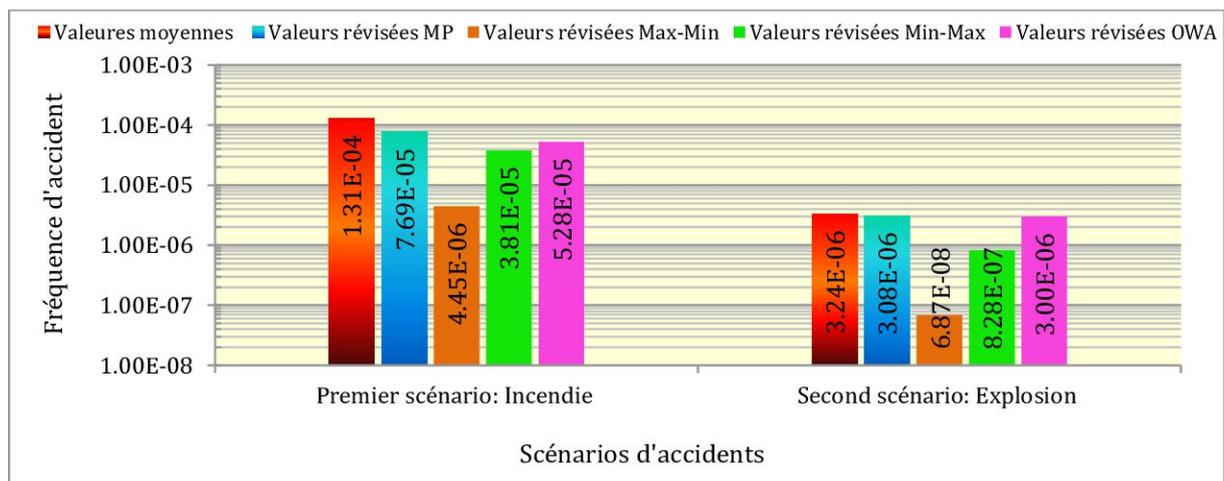


Figure IV.5. Variation des fréquences moyennes et révisées des scénarios d'accidents obtenues par différents opérateurs d'agrégation. Cas de deux scénarios.

#### ➤ Discussion des Résultats

D'après la figure IV.5, nous remarquons pour les deux scénarios que les valeurs des fréquences obtenues par l'opérateur OWA sont très proches (légèrement différentes) de celles de la moyenne pondérée avec le même ordre de grandeur. Par contre, les fréquences obtenues par les opérateurs d'agrégation « maximum » et « minimum » pondérés sont différentes de celles données par la moyenne pondérée avec une différence d'ordre de grandeur de 10.

### IV.5.4 Exploration de l'usage des modèles d'agrégation dans le cadre de BORA

La variabilité des scores et des poids des différents facteurs de risque rend difficile l'interprétation précise des résultats obtenus aux différents niveaux de calcul, à savoir les probabilités et les fréquences d'entrée, les PFDs des barrières et les fréquences des

accidents. Néanmoins, on pourrait faire sortir un certain nombre de remarques concernant la mise en œuvre des différents modèles d'agrégation qui ont fait l'objet de cette étude de cas.

#### **A) Concernant la moyenne pondérée**

- Elle considère d'emblé les RIFs indépendants entre eux, ce qui n'est pas entièrement satisfait en pratique. En effet, certains RIFs sont très dépendants les uns des autres et la prise en compte de ces interactions est fondamentale pour une prise de décision robuste et reflétant la réalité. Par exemple, nous pouvons traiter la dépendance préférentielle entre le RIF "maintenabilité" et le critère "incompétence humaine" en les regroupant dans un seul RIF équivalent.
- Pour certains RIFs, il a été constaté que les scores élevés compensent les scores les moins élevés ou faibles sans passer aux valeurs extrêmes. Par suite, par effet de compensation, on aura une certaine déformation des résultats conduisant à un score globale incorrect et non représentatif.

#### **B) Concernant le minimum pondéré**

Son intégration dans BORA a fait ressortir les remarques suivantes:

- Il a été constaté que pour que la probabilité révisée tend vers sa valeur inférieure (correspondant aux bonnes pratiques), il faut que les scores des RIF soient plus ou moins élevés.
- On a constaté aussi que sa façon de pondération par le maximum essaye toujours de limiter l'impact d'un score faible attribué à un RIF sur le score global (MF).

#### **C) Concernant le maximum pondéré**

Son intégration dans BORA a fait ressortir les remarques suivantes:

- Il a été constaté que pour que la probabilité révisée tend vers sa valeur supérieure (correspondant aux mauvaises pratiques), il suffit qu'un score d'un RIF important soit élevé. Ce qui exprime un effet de dominance d'un RIF par rapport aux autres.
- On a constaté aussi que sa façon de pondération par le minimum essaye toujours de limiter l'impact d'un score élevé attribué à un RIF sur le score global (MF).

#### **D) Concernant la moyenne pondérée ordonnée (OWA)**

Son intégration dans BORA a fait ressortir les remarques suivantes:

- Il a été constaté que sa tendance presque centrale donne plus d'importance soit aux petites valeurs avec une légère tendance vers les valeurs faibles, soit ou aux grandes valeurs avec une légère tendance vers les valeurs élevées de l'échelle de scores proposée sans atteindre les valeurs extrêmes.

## **IV.6 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons tenté de répondre au problème d'agrégation des facteurs de risques (RIFs) dans la méthode BORA. Notamment, le choix adéquat des opérateurs d'agrégation qui peut être une source d'incertitude liée aux modèles d'agrégation. En effet, les modèles d'agrégation ont pour but de représenter au mieux l'ensemble des valeurs d'entrée. L'objectif est alors de minimiser la perte d'information induite par la moyenne pondérée dans des situations où la dispersion des scores de RIFs est grande.

Il s'avère également de cette étude comparative que la moyenne pondérée ne donne pas les mêmes résultats que le minimum et le maximum pondérés et pourrait être inadéquate dans certaines situations se caractérisant par des composants de barrières de sécurité soumis à des états des RIFs très variés.

Les dépendances et les interactions entre les RIFs doivent être prises en considération. Il a été constaté que les opérateurs d'agrégation du type disjonctif semblent plus appropriés dans les situations les plus défavorables, i.e. avec au moins un score majoré et les opérateurs conjonctifs sont plus adéquats dans des situations contraires et ce, en vue minimiser davantage les erreurs commises sur les scores globaux (MF) des PFDs des barrières de sécurité et des fréquences des scénarios d'accidents.

## **CONCLUSION GÉNÉRALE**

La présente thèse avait un double objectif: i) Proposer une extension de la méthode « Analyse des Barrières et des Risques Opérationnels, connue en anglais sous « Barrier and Operational Risk Analysis (BORA) en intégrant une analyse d'importance des éléments constitutifs des barrières de sécurité et par conséquent, d'optimiser les stratégies de maintenance. ii) Minimiser la perte d'information et limiter le plus fidèlement possible les conditions réelles de fonctionnement et d'exploitation des systèmes industriels et ce, par agrégation des facteurs d'influence de risque (RIFs) par des modèles d'agrégation outre la moyenne pondérée.

Ces deux objectifs sont liés essentiellement à un problème d'incertitudes relatives d'une part, aux données d'entrée fournies par les experts (incertitudes épistémiques) et d'autre part, à la moyenne pondérée comme modèle d'agrégation des RIFs dans la méthode BORA conventionnelle (incertitudes de modélisation).

Dans ce qui suit, nous présentons la synthèse des travaux réalisés et les éventuelles perspectives de ces travaux.

### **Synthèse des travaux réalisés**

Dans cette thèse, nous avons présenté, dans un premier temps, la démarche générale de la gestion des risques et les principales méthodes d'analyse des risques et des barrières de sécurité, un intérêt particulier avait été donné à la méthode BORA, comme cadre méthodologique de la présente thèse. Entre autres, sont évoqués les avantages et les limites de cette méthode. Parmi ces dernières, on a pu constater : 1) l'absence des aspects du type « Optimisation des stratégies de maintenance » en vue d'améliorer les performances des barrières de sécurité et par conséquent, minimiser les fréquences des accidents. 2) l'application de la moyenne pondérée comme modèle d'agrégation des RIFs sans aucune référence aux critères d'applicabilité de ce modèle.

Dans un second temps, et en réponse à ces deux problèmes, deux solutions ont été respectivement proposées:

- 1) Nous avons proposé une approche "BORA-CIA", comportant dans sa première partie une BORA conventionnelle et dans sa deuxième partie une Analyse d'Importance de Criticité" (En anglais, Criticality Importance Analysis : CIA). Cette analyse d'importance a montré la variation de l'importance des éléments constitutifs (entre autres des composants) des barrières en considérant les conditions opérationnelles de ces éléments, exprimées en

termes de facteurs de risque (RIFs). L'objectif était de fournir un support d'aide à l'optimisation de la stratégie de maintenance et d'inspection des barrières de sécurité.

Par la suite, l'approche BORA-CIA a fait l'objet d'une validation par application à un système industriel opérationnel qu'est un séparateur de gaz d'un procédé de traitement de gaz de la compagnie SONATRACH. Cette étude de cas a permis de montrer que les résultats obtenus sont encourageant et que l'approche BORA-CIA est prometteuse d'un point de vue pratique. L'analyse de la variabilité de la criticité des éléments constitutifs des barrières de sécurité, exprimée en termes de variation de leur ordre d'importance en présence des RIFs est en faveur d'une amélioration du plan d'actions des opérations de maintenances. En effet, l'ordonnement de ces éléments sur la base des probabilités moyennes n'étant pas suffisant. Ceci a un effet direct sur l'analyse prévisionnelle de la performance des barrières de sécurité et par conséquent, sur l'estimation de la fréquence des accidents. En d'autre terme, on a pu remarquer l'effet des incertitudes paramétriques entre probabilités moyennes et probabilités révisées des événements de base sur l'ordre de criticité de ces événements.

- 2) Nous avons apporté des éléments de réponse au problème d'agrégation des Facteurs d'Influence de Risque en menant une étude comparative entre le modèle de la moyenne pondérée tel que utilisée par BORA conventionnelle et les modèles d'agrégation multicritère parmi les plus utilisés dans les applications pratiques, en l'occurrence le maximum pondéré, le minimum pondéré et la moyenne pondérée ordonnée. En considérant les fréquences révisées des événements initiateurs et les probabilités révisées des événements de base issues de l'agrégation par moyenne pondérée, comme valeurs de référence, nous avons constaté que les valeurs obtenues par le maximum et le minimum pondérés se diffèrent de celles de la moyenne pondérée d'un ordre de grandeur de 10. Le même résultat est constaté au niveau des PFD des barrières et des fréquences des accidents. Cette différence est significative si l'on considère les niveaux de confiance normalisés des barrières lesquels sont basés sur un facteur de 10. Cependant, les valeurs issues de l'opérateur OWA étaient proches de celles issues de la moyenne.

### **Difficultés et Perspectives**

Les travaux réalisés dans le cadre cette thèse ont visé de répondre à des problèmes concrets relatifs à la méthode BORA. Cependant, les bases de données peuvent servir de référence pour l'extraction des valeurs statistiques (i.e. probabilités et fréquences moyennes), le recours à l'expertise pour l'estimation des valeurs limites des probabilités et fréquences moyennes, des scores et poids des facteurs de risque, reste une tâche délicate nécessitant le développement d'une méthodologie d'extraction de la connaissance auprès des experts dans le contexte de l'entreprise algérienne.

Dans le même ordre d'idée, la représentation et le traitement des incertitudes épistémiques inhérents au jugement d'expert devraient être traités par des modèles plus souples. Il serait alors très intéressant de penser à l'application des techniques de l'intelligence artificielle et plus particulièrement la logique floue.

Nous pensons aussi que l'étude des critères d'acceptabilité des risques dans un environnement opérationnel sera un autre complément de la méthode BORA. Cette étude devrait être entreprise en parallèle avec l'intégration d'une analyse "Coût-Bénéfice». En effet la variabilité des PFDs des barrières de sécurité et des fréquences des accidents à un impact direct sur le budget alloué à la maintenance et la sécurité des équipements.

## **RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

[Abrahamsson, 2002] M. Abrahamsson, «Uncertainty in Quantitative Risk Analysis, Characterisation and Methods of Treatment», Department of Fire Safety Eng., Lund University, Report no 1024, 2002.

[Aczel, 1948] J. Aczel, On mean values. Bulletin of the American Mathematical Society, 54(4):392-400. 1948.

[AFNOR, 2003] Norme française NF X 50-110 - Qualité en expertise : Prescriptions générales de compétence pour une expertise, 2003. AFNOR, Saint-Denis La Plaine, France.

[Amory, 2016] J. Amory. La défense en profondeur d'un système complexe. Principes et méthodologie de référence date de publication: juillet 2016.

[Arthur and Dowell, 1988] M. Arthur Dowell I, Layer of protection analysis for determining safety integrity level, ISA Transactions, vol. 37, No. 3, pp. 155-165, 1998.

[Ayyub et Klir., 2006] B.M. Ayyub, G.J. Klir. Uncertainty modeling and analysis in engineering and the sciences. CRC Press. 2006.

[Aven et al., 2006a] T. Aven, S. Haugen and S. Sklet. Methodology for Incorporating Human and Organizational Factors in Risk Analysis for Offshore Installations. International Journal of Materials & Structural Reliability 4, No.1: 1-14.

[Aven et al., 2006b] T. Aven, S. Sklet, and J.E. Vinnem. Barrier and operational risk analysis of hydrocarbon releases (BORA-Release): Part I: Method description. J. Hazard. Mater. 137. 681-691.

[Beliakov et al., 2008] G. Beliakov, A. Pradera, and T. Calvo. Aggregation Functions: A guide for practitioners. Studies in Fuzziness and Soft Computing. Springer-Verlag, 2008.

[Blockley 2013] D. Blockley (2013). Analysing uncertainties : Towards comparing Bayesian and interval probabilities'. Mechanical Systems and Signal Processing 37(1-2) : 30-42.

[Boissier, 1993] D. Boissier J. Al-Hajjar. Système interactif d'aide à la décision (SIAD) et incertain en génie civil, Europ IA'93 - Delft - The Netherlands - 21-24 juin 1993.

[Bouchon-Meunier, 1995] B. Bouchon-Meunier. Mesures floues. La logique floue et ses applications. Addison-Wesley, 1995, 84-92.

[Bourareche, 2009] M. Bourareche. Apport des techniques floues et possibilistes à l'analyse semi-quantitative des risques industriels. Mémoire du magister en hygiène et sécurité industrielle. Option : Gestion des Risques. Université El Hadj Lakhdar, Batna, 2009.

[Bourareche et al., 2015] M. Bourareche, R. Nait-Said, and N. Ouazraoui. Implementing BORA in Oil and Gas Process, Case Study: Algerian Industry". IEEE Proceedings of the 2015 International Conference on Industrial Engineering and Operations Management. Dubai, United Arab Emirates (UAE).

[Bourareche et al., 2018a] M. Bourareche, R. Nait Said, N. Ouazraoui, I. Sellami, and H. Boussedjada. Performances des barrières de sécurité, un indicateur de bonne maîtrise des risques d'un procédé industriel. 7ème Conférence Internationale: Conception et Production Intégrées, CPI'2011, Oct 2011, Oujda, Maroc. Edition HAL Id: hal-01839230.

[Bourareche et al., 2018b] M. Bourareche, Z. Chiremsel, R. Nait Said and N. Ouazraoui. Towards a Reliable Decision Making on Safety Barriers Performance based on Expert Judgments in the Framework of BORA Approach. Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management Paris, France, July 26-27, 2018

[Bourareche et al., 2020] M. Bourareche, R. Nait Said, F. Zidani and N. Ouazraoui. Improving barrier and operational risk analysis (BORA) using criticality importance analysis case study: oil and gas separator. World Journal of Engineering, Vol. 17 No. 2, pp. 267-282. <https://doi.org/10.1108/WJE-04-2019-0129>.

[Brissaud et al., 2009] F. Brissaud, D. Charpentier, M. Fouladirad, A. Barros, and C. Bérenguer. Safety instrumented system evaluation with influencing factors in Safety, reliability and risk analysis: Methods and applications. *S. Martorell, C.G. Soares & J.B. Barnett (Editors), Vol. 3, CRC Press, Netherlands.*

[Bucelli et al., 2018] M. Bucelli, G. Landucci, S. Haugen, N. Paltrinieri, and V. Cozzani. Assessment of safety barriers for the prevention of cascading events in oil and gas offshore installations operating in harsh environment. *J. Ocean Engineering 158. 171-185.*

[Calvo et al., 2002] T. Calvo and G. Mayor and R. Mesiar, Aggregation Operators: New Trends and Applications. Physica-Verlag, 2002.

[CCPS, 1989] Center for Chemical Process Safety (CCPS). Guidelines for process equipment reliability data with data tables. American Institute of Chemical Engineers (AIChE). New York.

[CCPS, 2000] Center for Chemical Process Safety (CCPS). Guidelines for chemical process quantitative risk analysis, Center for Chemical Process Safety of the American Institute for Chemical Engineers, New York 2000.

[CCPS, 2001] Center for Chemical Process Safety (CCPS). Layer of protection analysis: simplified process risk assessment. American Institute of Chemical Engineers (AIChE). New York, 2001.

[CCPS, 2009] Center for Chemical Process Safety (CCPS). Guidelines for Developing Quantitative Safety Risk Criteria. American Institute of Chemical Engineers (AIChE). New York.

[CEI 61882, 2007] CEI 61882, Études de danger et d'exploitabilité (Études HAZOP) – guide d'application, safety-barrier diagrams, 2007.

[Chan et al, 2005] A. Chan Jian-Bo Yang and Kwai-Sang Chin., Development of fuzzy FMEA based product design system. International Journal of Advanced Manufacturing Technology. November 2005.

[Chettouh et al., 2018] S. Chettouh, R. Hamzi, and M. Chebila. Contribution of the lessons learned from oil refining accidents to the industrial risks assessment. Management of Environmental Quality: An International Journal, Vol. 29 No. 4, pp. 643-665.

[Cohen et al., 2003] J. Cohen, P. Cohen, S.G. West and L.S. Aiken. Applied Multiple Regression/Correlation Analysis for the Behavioral Sciences". Lawrence Erlbaum Associates Publishers. Third Edition, Mahwah, New Jersey London. 2003.

[Cooke, 1991] R. Cooke. Experts in uncertainty: opinion and subjective probability in science. Oxford University Press, 336 p. 1991.

[Desroches et al., 1995 ] A. Desroches. Concepts et méthodes probabilistes de base de la sécurité. Lavoisier, France, 1995.

[Desroches, 2009] A. Desroches. Principes et pratiques de l'analyse préliminaire des risques. Ed Hermes science.

[Detyniecki, 2000] M. Detyniecki. Mathematical Aggregation Operators and their application to video querying. PhD thesis, University of Paris VI, 2000.

[Ditlevsen 1983] O. Ditlevsen (1983). Model uncertainty in structural reliability. Structural safety 1(1) :73–86.

[Dubois and Prade, 1988] Dubois. D and Prade. H, possibility theory. Plenum Press, New – York, 1988.

[Dubois et Prade, 1994] D. Dubois et H. Prade La fusion d'informations imprécises, Traitement du Signal, Volume 11- N° 6, 1994.

[Dubois et al., 1997] D. Dubois, H. Fargier, and H. Prade. Beyond min aggregation in multicriteria decision :(ordered) weighted min, discri-min, leximin. In R.

[Dubois, 2003] Dubois, D. « Représentations de l'incertain logique floue, probabilités non additives application à la fusion d'information et à l'évaluation multiattribut ». Support de cours de DEA-IIL, 2003.

[Duijm, 2008] N.J. Duijm. Safety-barrier diagrams. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability. Vol 222, Issue 3, pp. 439 – 448.

[Dumitrescu et al, 2002 ] M. Dumitrescu . A. Munteanu. P. Ulmeanu. Fuzzy Logic System for Fuzzy Event Tree Computing. First international IEEE symposium 'intelligent systems'. September 2002.

[Dutuit et Rauzy, 2014] Y. Dutuit & A. Rauzy. Importance Factors of Coherent Systems: A Review, Journal of Risk and Reliability, vol. 228 (3), pages 313-323.

[Filev and Yager, 1998] D. Filev and R. Yager. On the issue of obtaining OWA operator weights. Fuzzy Sets and Systems, 94:157–169, 1998. 77

[Florent et all, 2009 ]B. Florent, L. Brice. Les probabilités de défaillances comme indicateurs de performances des barrières techniques de sécurité, approche analytique,

[Grabisch et al., 2009] M. Grabisch, J. Marichal, R. Mesiar, and E. Pap. Aggregation Functions. Number 127 in Encyclopedia of Mathematics and its Applications. Cambridge University Press, 2009.

[Haddad, 2012] S. Haddad. Evaluation et optimisation des performances des systèmes instrumentés de sécurité pour une meilleure maîtrise des risques. Mémoire du magister en hygiène et sécurité industrielle. Option : Gestion des Risques. Université El Hadj Lakhdar, Batna, 2012.

[Haimes, 2009] Y.Y. Haimes (2009). Risk Modeling, Assessment, and Management. John Wiley and Sons.

[Haugen et al., 2010] S. Haugen, S. Jorunn, S. Sklet, J.E. Vinnem. Operational Risk Analysis–Total Analysis of Physical and Non-physical Barriers. Generalization Report Rev 01, 29.

[Hefaidh et al., 2019] H. Hefaidh, M. Djebabra, L. Sedrat, and M. Taghelabet. Contribution to the evaluation of safety barriers performance. World Journal of Science, Technology and Sustainable Development, Vol. 16 Issue: 1, pp.56-68.

[Helton et al. 2004]J.C. Helton, J.D. Johnson et W.L. Oberkampf (2004). An exploration of alternative approaches to the representation of uncertainty in model predictions. Reliability Engineering and System Safety 85 (1) :39–71.

[Hoffman et Hammonds 1994]F.O. Hoffman et J.S. Hammonds (1994). Propagation of uncertainty in risk assessment : the need to distinguish between uncertainty due to lack of knowledge and uncertainty due to variability. Risk Anal. 14(5) : 707–712.

[Hwang and Yoon, 1981] C.L. Hwang, K. Yoon, (1981) Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications. Springer-Verlag, New York. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-48318-9>.

[ICSI, 2009] Institut pour une Culture de Sécurité Industrielle (ICSI), «Fréquence des événements initiateurs et disponibilité des barrières de prévention», disponible sur : <http://www.icsi-eu.org/>, 2009.

[ICSI, 2011] Institut pour une Culture de Sécurité Industrielle (ICSI), «Pratiques de la decision en situation d'incertitude- approche de l'incertitude» disponible sur: <http://www.CSI.org/fr/>, 2011.

[IEC 61511, 2003] IEC 61511, Standard, Functional safety-Safety instrumented systems for the process industry sector-, Parts 1-3, First édition, 2003.

[IEC 61508, 2016] IEC 61508-Partie 1. Norme de la Commission Internationale d'Electrotechnique, IEC, Geneva, Switzerland, 2016.

[IEC 61025, 2016] IEC 61025. Fault tree analysis (FTA)", International Electrotechnique Commission (IEC). Edition 2.0 2016-12.

[IEC 61882, 2016] Norme IEC 61882. Hazard and operability studies (HAZOP studies)- Application guide. International Electrotechnique Commission (IEC).Edition 2.0 2016-03.

[Innal, 2008] F. Innal. Contribution à la modélisation des systèmes instrumentés de sécurité et à l'évaluation de leurs performances : analyse critique de la norme CEI 61508. Thèse de doctorat en Sciences Physiques et de l'Ingénieur. Automatique, Productique, Signal et Image. Sûreté de fonctionnement.

[INERIS DRA-007, 2003] INERIS DRA-007, Eléments Importants Pour la Sécurité (EIPS), Rapport Ω6, 2003.

[INERIS ARAMIS, 2004] INERIS BCRD ARAMIS, Développement d'une méthode intégrée d'analyse des risques pour la prévention des accidents majeurs, 2004.

[INERIS DRA, 2005] INERIS-DRA-039, Evaluation des Barrières Techniques de Sécurité, rapport Ω 10, 2005.

[INERIS DRA35, 2006] Omega 7 - Méthodes d'analyse des risques générés par une installation industrielle. RAPPORTS D'APPUI / GUIDES .PDF24 décembre 2006 1.04 Mo

[INERIS DRA-77, 2009] Rapport Ω 20, Maîtrise des risques accidentels par les dispositions technologiques et organisationnelles-Démarche d'évaluation des Barrières Humaines de Sécurité. <http://www.ineris.fr>

[INERIS, 2009] "Évaluation des performances des barrières de sécurité techniques et humaines": Fiche d'informations techniques relatives aux dispositifs de sécurité. <http://www.ineris.fr>

[INERIS-DRA-14, 2015] Agrégation semi-quantitative des probabilités dans les études de dangers des installations classées -Ω Probabilités, DRA-14-141478-10997A du 20/10/2015.

[INERIS-DRA-76, 2015] Formalisation du savoir et des outils dans le domaine des risques majeurs (EAT-DRA-76) Étude de dangers d'une installation classée - -9Ω

[INERIS DRA-17, 2018] Rapport Ω 10, Évaluation de la performance des Barrières Techniques de Sécurité, 2018.

[INSAG, 2010] INSAG-10. International Nuclear Safety Advisory group. Defence in depth in nuclear safety, A report by the International Nuclear Safety Advisory Group. Edition 2010.

[ISO, 1999] ISO, Aspects liés à la sécurité: Principes directeurs pour les inclure dans les normes. Organisation Internationale de normalisation, 1999.

[ISO, 2002] ISO, Management du risque: Vocabulaire, Principes directeurs pour l'utilisation dans les normes. Organisation Internationale de normalisation, 2002.

[ISO 31000, 2009] Norme Iso/Cei, 31000 (2009). Management du risque. Principes et lignes directrices.

[ISO/IEC 27005, 2011]. « ISO/IEC 27005:2011, Technologies de l'information-Techniques de sécurité -- Gestion des risques liés à la sécurité de l'information » [archive], sur ISO, 1er juin 2011 (consulté le 31 décembre 2015).

[Kang et al., 2016] J. Kang, J. Zhang J. Gao. Analysis of the safety barrier function: Accidents caused by the failure of safety barriers and quantitative evaluation of their performance. Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 43. 361-371.

[Kolmogorov, 1930] A. Kolmogorov. Sur la notion de moyenne. Rendiconti Accademia dei Lincei, 12(6):388-391, 1930.

[Krantz et al, 1971] D.H. Krantz, R.D. Luce, P. Suppes et A. Tversky, Foundations of measurement: Polynomial Representations, Vol. 1, Academic Press, first edition.1971.

[Kumar et al,2005] D. Kumar. P. Kumar and R. S. kumar. Systemic failure mode effect analysis (FMEA) using fuzzy linguistic modelling. International Journal of Quality and Reliability Management. Vol.22 No.9 .2005.

[Lambert, 1979] H. LAMBERT. Measures of importance of events and cut sets in fault trees. In R.E. Barlow, J.B. Fussel, and N.D. Singpurwalla, editors, Reliability and Fault Tree Analysis.

[Lannoy et Procaccia, 2001]. A. Lannoy, H. Procaccia. L'utilisation du jugement d'expert en sûreté de fonctionnement. Edition EDF, p: 392. Date de parution, 2001

[Le Duy, 2011] T.D. Le Duy «Traitement des incertitudes dans les applications des Études Probabilistes de Sûreté Nucléaire», Université de Technologie, Troyes, 2011.

[Liang et al., 1993] G-S. Liang. and M-J. Wang. Fuzzy fault-tree analysis using failure possibility. Micro-electronics and Reliability, 33 :583-597, 1993.

[Lievens, 1976] C. Lievens. Sécurité des systèmes. Cepadues éditions, Toulouse, France.

[Lloyd et Ries, 2007]S.M. Lloyd and R. Ries (2007) Characterizing, propagating, and analyzing uncertainty in life-cycle assessment - A survey of quantitative approaches. Journal of Industrial Ecology 11 (1) :161-179.

[Marichal et al., 1998] J. Marichal. Aggregation Operators for Multicriteria Decision Aid. PhD thesis, University of Liège, 1998.

[Markowski, 2010 ] A.S. Markowski, M.S. Mannan, A. Kotynia, D. Siuta, « Uncertainty aspects in process safety analysis », J. Loss. Prev. Proc. Ind. 23, 446-4542010.

[Mazouni, 2009 ] M.H. Mazouni, «Pour une meilleure approche du management des risques: de la modélisation ontologique du processus accidentel au système interactif d'aide à la décision». Thèse du Doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, 2008.

[Morgan et Henrion 1992] M.G. Morgan et M. Henrion (1992). *Uncertainty : a guide to dealing with uncertainty in quantitative risk and policy analysis*. Cambridge University Press, New York, USA.

[Oberkampf et al. 2002] W.L. Oberkampf, S.M. DeLand, B. M. Rutherford, K.V. Diegert et K.F. Alvin (2002). Error and uncertainty in modeling and simulation. *Reliability Engineering and System Safety* 75(3) : 333–357.

[Ouazraoui et al., 2013] N. Ouazraoui, R. Nait Said, M. Bourareche and I. Sellami, «Layers of protection analysis in the framework of possibility theory», *J. Haz. Mat.* 262, 168– 178, 2013.

[Pages et Gondran, 1980] A. Pages & A. Rauzy. *Fiabilité des systèmes*, Ed. Eyrolles, 1980, Paris (France).

[Prashanth et al., 2017] I. Prashanth, G.J. Fernandez, R.G. Sunder, and B. Boardman, (2017). Factors influencing safety barrier performance for onshore gas drilling operations. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 49. 291-298.

[Rahimi et al., 2013] M. Rahimi, and M. Rausand. Prediction of failure rates for new subsea systems: a practical approach and an illustrative example. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability*. Vol 227, Issue 6, pp. 629 – 640.

[Rausand et al., 2004] M. Rausand, and A. Hoyland. *System Reliability Theory: Models, Statistical Methods and Applications*. Second edition, A John Wiley & Sons, Inc.

[Rausand, 2011] M. Rausand. *Risk Assessment: Theory, Methods, and Applications*". John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.

[Sallak et al., 2008] M. Sallak, C. Simon, J.F. Aubry, « A Fuzzy Probabilistic for Determining Safety Integrity Level», *IEEE Trans. on Fuzzy Syst.*, 16, 239-248, 2008.

[Schweizer and Sklar, 1983] B. Schweizer and A. Sklar. *Probabilistic Metric Spaces*. North-Holland, Amsterdam, 1983. K. Menger. *Statistical metrics*. *Proc. National Academy of Science USA*, 28:535–537, 1942.

[Reason et al, 1997] J. Reason, *Managing the risks of organizational accidents*. Published by Ashgate Publishing Limited Gower House Croft Road Aldershot Hants GUL1 3HR England Ashgate Publishing Company 131 Main Street Burlington, VT 05401-5600 USA.

[Shafer,1976] G. Shafer. *A Mathematical Theory of Evidence*. Princeton University Press, 1976.

[Singer et al., 1990] D. Singer. A fuzzy set approach to fault tree and reliability analysis. *Fuzzy Sets and Systems*, 34:145–155, 1990.

[SINTEF, 2010] *Reliability data for safety instrumented system, PDS data handbook*. 2010, Edition. SINTEF, Trondheim, Norway.

[Sklet, 2005] S. Sklet. *Hydrocarbon releases on oil and gas production platforms: Release scenarios and safety barriers*, 2005.

[Sklet et al., 2004] S. Sklet, S. Haugen. Safety barriers to prevent release of hydrocarbons during production of oil and gas". SINTEF Report, Trondheim, Norway. No: STF38 A04419.

[Sklet, 2006a] S. Sklet. Safety barriers: definition, classification, and performance. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Vol. 19 No. 5, pp. 494-506.

[Sklet, 2006b] S. Sklet. Hydrocarbon releases on oil and gas production platforms: release scenarios and safety barriers. *J. Loss Prevent. Process Ind.* 19 (2006) 481-493.

[Sklet et al., 2006] S. Sklet, J.E. Vinnem and T. Aven. Barrier and operational risk analysis of hydrocarbon releases (BORA-Release): Part II Results from a case study. *Journal of Hazardous Materials*; March 2006.

[Smith et Simpson, 2004] D.J. Smith & K.G.L Simpson, *Functional Safety, A straight forward guide to applying IEC 61508 and related standards*, Ed. Elsevier, Butterworth-Heinemann, 2004.

[Smith, 2011] D.J. Smith. *Reliability, Maintainability and Risk, Practical methods for engineers*. published by Elsevier Ltd.

[Soman et al., 1993] Soman. K.P and K.B. Misra. Fuzzy fault tree analysis using resolution identity. 1, page 193, 1993.

[Sonatrach, 2010] Guide opérationnel. Risk analysis and maintenance guides of process, SONATRACH Company", Hassi R'Mel, Rep. S-30-1240-140, 2010.

[Stapelberg, 2009] R.F. Stapelberg. *Handbook of reliability, availability, maintainability and safety in engineering design*. Springer-Verlag, London.

[Sultana et al., 2019] S. Sultana, B. S. Andersen, and S. Haugen. Identifying safety indicators for safety performance measurement using system engineering approach. *Journal of Process Safety and Environmental Protection* 128.107-120.

[Tanaka et al, 1983 ] L. T. Tanaka, F. S. Fan, Lai, and K. Toguchi. Fault tree analysis by fuzzy probability. *IEEE Transactions on Reliability*, 32 :453-457, 1983.

[Torra, 1997] V. Torra. The weighted OWA operator. *International Journal of Intelligent Systems*, 12: 153-166, 1997.

[Torra and Narukawa, 2007] V. Torra and Y. Narukawa. *Modeling Decisions: Information Fusion and Aggregation Operators*. Springer, 2007.

[Villemeur, 1988] A. Villemeur. *Sûreté de fonctionnement des systems industriels. Fiabilité - Facteurs humains - Informatisation*. Editions Eyrolles, 798 p.

[Vinnem et al., 2008] J.E. Vinnem, J. Seljelid, S. Haugen, S. Sklet, and T. Aven. Generalized methodology for operational risk analysis of offshore installations. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability*, Vol 223, Issue 1.

[Yager, 1988] R. Yager, On ordered weighted averaging aggregation operators in multicriteria decision making, *IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics*, Vol. 18, pp. 183-190, 1988.

[Yager et al., 1997] R. Yager and J. Kacprzyk. The Ordered Weighted Averaging Operation: Theory, Methodology and Applications. Kluwer: Norwell, 1997.

[Youngjung et al., 2009] G. Youngjung, H. Seol, S. Lee, and P. Yongtae. Application of fault tree analysis to the service process: service tree analysis approach. Journal of Service Management, Vol. 20 Issue: 4, pp.433-454.

[Zadeh, 1965] L.A. Zadeh. Fuzzy sets, Information and Control, vol. 8, pp. 338-353, 1965.

[Zadeh, 1978] L.A. Zadeh. Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility. Fuzzy Sets and Systems, 1 :3-28, 1978.

[Zio, 2007] E. Zio. An Introduction to the Basics of Reliability and Risk Analysis. Series on Quality, Reliability and Engineering Statistics. Vol.1.Copyright, 2007 by World Scientific Publishing Co.Re.Ltd.3.

## **ANNEXES**

Annexe A: Liste générique des facteurs d'influence de risques (RIFs)

Annexe B: Propriétés des opérateurs d'agrégation

Annexe C: Travaux réalisés dans le cadre de la thèse

## Annexe A

### Liste générique des facteurs d'influence de risques (RIFs)

Groupe de RIFs	RIFs	Aspects liés aux facteurs de risques
Personnels	Compétence	Compétence, expérience, connaissance du système et formation du personnel.
	Charge de travail/stress	Charge de travail générale sur les personnes (toutes les tâches et activités), stress au travail.
	Milieu de travail	Environnement de travail physique comme bruit, vibration, lumière, utilisation de substances chimiques, etc.
	Fatigue	Fatigue de la personne, travail de nuit, les heures supplémentaires.
Tâche	Méthodologie	Méthodes et procédures suivies pour effectuer les opérations spécifiques.
	Supervision de la tâche	Supervision des tâches spécifiques par un superviseur (p. ex., par le gestionnaire des opérations ou supervision mécanique).
	Complexité de la tâche	Complexité d'une tâche spécifique.
	Pression du temps	Pression du temps dans la planification, l'exécution d'une tâche spécifique.
	Outils	Disponibilité et efficacité opérationnelles des outils nécessaires pour effectuer une tâche.
	Pièces de rechange	Disponibilité des pièces de rechange nécessaires pour effectuer la tâche.
Système technique	Conception de l'équipement	Conception d'équipements et de systèmes tels que le type de bride (brides pleines des soupapes des vannes).
	Propriétés des matériaux	Propriétés du matériau sélectionné en ce qui concerne la corrosion, l'érosion, fatigue, joint propriétés des matériaux, etc.
	Complexité du processus	Complexité générale de système de processus dans son ensemble.
	HMI (Interface homme-machine)	Interface homme-machine comme les facteurs ergonomiques, étiquetage du matériel, positionnement des soupapes, des alarmes, etc.

	Maintenabilité /accessibilité	Maintenabilité des équipements et des systèmes tels que l'accessibilité aux valves et brides, espace pour utiliser les outils nécessaires, etc.
	Rétroaction du système	Comment les erreurs et les échecs sont instantanément détectés, à cause de l'alarme, défaut de démarrage, etc.
	Condition technique	Conditions de l'installation technique.
Contrôle administratif	Procédures	Qualité et disponibilité des procédures permanentes et les descriptions de tâche/projet.
	Permis de travail	Système de travail permet, comme le demande, examen, approbation, suivi et contrôle.
	Instructions de travail	Qualité et disponibilité de descriptions de travail comme analyse de sécuritaire des tâches (SJA) et plans d'isolement.
	Documentation	Qualité, disponibilité et mise à jour des dessins, P & ID, dossiers techniques et réglementaires des équipements etc.
Facteurs organisationnels	Programmes	Étendue et la qualité des programmes de maintenance préventive (PM), surveillance (CM), inspection, 3ème contrôle du parti du travail, utiliser des listes de contrôle/commande libre, etc.. Un aspect important est si PM, CM, etc., est spécifié
	Pratique de travail	Pratique courante au cours de l'accomplissement d'activités professionnelles. Facteurs comme s'il procédures et listes de contrôle sont utilisés et suivi, si les raccourcis sont acceptées, se concentrent sur le temps avant la qualité, etc.
	Supervision	Supervision sur la plateforme comme le suivi des activités, suivi de plans, délais, etc.
	Communication	Communication entre les différents acteurs comme directeur de plateforme secteur, superviseurs, zone techniciens, entrepreneurs de maintenance, techniciens de la CCR, etc..
	Propreté et nettoyage	Nettoyage général et l'ordre dans différents zones sur la plateforme (Ex: bacs de stockage)
	Systèmes de soutien	Qualité des systèmes de support de données comme SAP, etc.
	Critères d'acceptation	Définitions des critères d'acceptation spécifiques associés par exemple: État de surveillance, inspection, etc.
	Activités simultanées	Quantité d'activités simultanées, soit prévues (maintenances et modifications) et imprévues (arrêt).
	Gestion des changements	Changement et modification des parties des systèmes et changements pièces de rechange

## ANNEXE B

### PROPRIÉTÉS DES OPÉRATEURS D'AGRÉGATION

L'emploi judicieux des opérateurs d'agrégation n'est pas un problème aisé, et le choix devra s'orienter suivant les propriétés que l'on désire obtenir. Les propriétés souvent requises sont les suivantes:

- **La monotonie** : l'augmentation d'un des scores sur les critères ne peut provoquer une diminution du score global.

$$\forall i, (a'_i > a_i) \Rightarrow (\psi(a_1, \dots, a'_i, \dots, a_n) \geq \psi(a_1, \dots, a_i, \dots, a_n)) \quad (\text{B.1})$$

- **La continuité** : un petit changement d'un des scores ne peut provoquer un grand changement sur le score global.
- **L'idempotence ou unanimité** : si tous les scores sont égaux à une valeur  $a$ , le score global vaut  $a$  également.

$$\forall a \in [0, 1], \psi(a, a, \dots, a) = a \quad (\text{B.2})$$

- **L'invariance au changement d'échelle** : si les scores sont sur un certain type d'échelle (ordinaire, d'intervalle ou de rapport), le score global doit être sur le même type d'échelle. Ceci impose des propriétés d'invariance qui sont :

- *Échelle ordinaire* : invariance à toute transformation strictement croissante  $\phi$  :

$$\psi(\phi(a_1), \dots, \phi(a_n)) = \phi(\psi(a_1, \dots, a_n)) \quad (\text{B.3})$$

- *Échelle d'intervalle* : invariance à toute transformation affine positive :

$$\forall r > 0, \forall t \in \mathfrak{R}, \psi(ra_1 + t, \dots, ra_n + t) = r\psi(a_1, \dots, a_n) + t \quad (\text{B.4})$$

- *Échelle de rapport* : invariance à tout facteur d'échelle :

$$\forall r \in \mathfrak{R}, \psi(ra_1, \dots, ra_n) = r\psi(a_1, \dots, a_n) \quad (\text{B.5})$$

## Annexe C

### Travaux réalisés dans le cadre de la thèse

[Bourareche et al., 2015] M. Bourareche, R. Nait-Said, and N. Ouazraoui. Implementing BORA in Oil and Gas Process, Case Study: Algerian Industry". *IEEE Proceedings of the 2015 International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*. Dubai, United Arab Emirates (UAE).

[Bourareche et al., 2018a] M. Bourareche, R. Nait Said, N. Ouazraoui, I. Sellami, and H. Boussedjada. Performances des barrières de sécurité, un indicateur de bonne maîtrise des risques d'un procédé industriel.. Edition HAL Id: hal-01839230.

[Bourareche et al., 2018b] M. Bourareche, Z. Chiremsel, R. Nait Said and N. Ouazraoui. Towards a Reliable Decision Making on Safety Barriers Performance based on Expert Judgments in the Framework of BORA Approach. *Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management Paris, France, July 26-27, 2018*

[Bourareche et al., 2020] M. Bourareche, R. Nait Said, F. Zidani and N. Ouazraoui. Improving barrier and operational risk analysis (BORA) using criticality importance analysis case study: oil and gas separator. *World Journal of Engineering*, Vol. 17 No. 2, pp. 267-282. <https://doi.org/10.1108/WJE-04-2019-0129>.

## 1 [Bourareche et al. 2015]

*Proceedings of the 2015 International Conference on Industrial Engineering and Operations Management  
Dubai, United Arab Emirates (UAE), March 3 – 5, 2015*

## *Implementing BORA in Oil and Gas Process Case Study: Algerian Industry*

*Mouloud Bourareche, Rachid Nait-Said, Nouara Ouazraoui*

Laboratory of Research in Industrial Prevention (LRIP), Health and Occupational Safety Institute  
University of Batna, Road Med El-Hadi Boukhrouf, Batna 05000, Algeria.

E-mails: mouloud.bourareche@hotmail.fr, r\_nait\_said@hotmail.com, ouzraoui@yahoo.fr.

**Abstract**—This paper intends to present and implement a Barrier and Operational Risk Analysis (BORA) approach in oil and gas process in Algerian industry. This recent approach, despite of its analysis which based on the basic and classical methods such as barrier block diagrams, fault trees (FT) and influence diagrams. It is considered very suitable and practical in terms of decision-making as regards to risk analysis. In fact, Barrier block diagrams are applied to illustrate the accident scenarios including the functioning of safety barriers. Fault trees are used to analyze the performance of safety barriers. While the influence diagrams are used in order to analyze the effects of risk influencing factors (RIFs) on the initiating event (IE) and basic events relating to safety barriers.

This study aims at showing: (1) the applicability and feasibility of BORA as approach in oil and gas process in Algerian industry, and (2) the advantages and limitations of its implementation concerning the lack of information and the use expert judgment for quantifying the risk influencing factors of each initiating and basic events. At last, some perspectives about these limitations were presented in order to improve this approach. For that, BORA is applied on an operational process, a combustible gas balloon (G01-VN-45-01) within the unit of gas treatment (UTGA), Sonatrach, Algeria).

**Key-words:** Risk analysis, BORA approach, Fault Tree, Diagram block barrier, safety barrier. Risk influencing factors.

### I. INTRODUCTION

Nowadays, in the industrial world, particularly oil and gas industries, many accidents may occur causing several victims and damages on installations and the environment. The extent and the frequency of these accidents remain forever on the increase. For a long time, in Algeria, the oil and gas industry has invested considerable resources in engineering safeguards, or barriers against fire and explosion hazards on their installations.

The occurrence of these accidents indicates clearly that safety barriers relating to scenarios are not functioning sufficiently well during these operations. To reduce them, these establishments must continually provide considerable efforts. In that case, analysis of the safety functions realized by technical and organizational safety barriers is indispensable to verify if these systems ensure this reduction.

For that purpose, as known, many approaches are aimed primarily at insuring that, these installations are designed and operated to meet "acceptable or tolerable risk level". These risk analysis techniques usually encompass the following

steps: (1) hazards identification, (2) accident scenarios development, (3) risk estimation in terms of frequencies and severity quantification, (4) risk classification (acceptable or unacceptable), and (5) risk control by implementing and managing safety barriers.

In this context, among relevant techniques and approaches that existing, the BORA is relatively new approach developed for qualitative and quantitative risk and safety barriers analysis. It combines a barrier block diagrams, fault trees (FT), and risk influence diagrams in order to analyse the accident scenarios that may occur on oil and gas industries [13].

This recent approach has been chosen because of its analysis of operational factors (human, technical and organizational factors) that contributed in these accidents. Furthermore, the importance that is given to safety barriers [1], [13]. In fact, it allows to analyzing the major accident scenarios and the performance of all safety barriers existing and opposing the development of these scenarios. For this reason, the qualitative and quantitative treatment using fault tree analysis (FTA) is applied, and then influence diagram is used to analyze the effect of risk influencing factors (RIFs) on the initiating basic events in the fault trees. More details and explanations for each step will be given in the following subsections.

In this context, several papers have been developed, among these works, Skelt and all have proposed a new BORA method "BORA-Release" intended for qualitative and quantitative risk analysis of hydrocarbon releases to prevent releases on offshore oil and gas production platforms [2],[13],[14].

The main goal of this paper is to concretize the BORA approach in oil and gas production in the Algerian industry, to show strengths and advantages of its application as regards to quantitative risk assessment and safety barriers performances; therefore, to surmount the limitations and weaknesses of this approach in terms of the lack of information and data for probabilities, frequencies and RIFs. Moreover, experts' judgments that will be well justified and even become a data source that could not be bypassed.

For this end, the rest of this paper is structured as follows: section 2 describes briefly the BORA approach. Section 3 and 4 presents the case study including the application of BORA.

Finally, section 5 and 6 offers a summary of the present work and critical analysis about BORA approach.

## 2 [Bourareche et al. 2018a]



### **Performances des barrières de sécurité, un indicateur de bonne maîtrise des risques d'un procédé industriel**

Mouloud Bourareche, Nouara Ouazraoui, Rachid Nait-Saïd, Ilyas Sellami,  
Hassene Boussedjada

#### ► To cite this version:

Mouloud Bourareche, Nouara Ouazraoui, Rachid Nait-Saïd, Ilyas Sellami, Hassene Boussedjada. Performances des barrières de sécurité, un indicateur de bonne maîtrise des risques d'un procédé industriel. 7ème Conférence Internationale: Conception et Production Intégrées, CPI'2011, Oct 2011, Oujda, Maroc. hal-01839230

**HAL Id: hal-01839230**

**<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01839230>**

Submitted on 14 Jul 2018

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

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

### 3 [Bourareche et al. 2018b]

*Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management  
Paris, France, July 26-27, 2018*

## **Towards a Reliable Decision Making on Safety Barriers Performance based on Expert Judgments in the Framework of BORA Approach**

**Mouloud Bourareche, Zakarya Chiremsel, Rachid Nait-Said, Nouara Ouazraoui**

Laboratory of Research in Industrial Prevention (LRIP)  
Health and Occupational Safety Institute. University of Batna 2.  
Road of Constantine N°53. Fesdis. Batna, 05078, Algeria.

[mouloud.bourareche@hotmail.fr](mailto:mouloud.bourareche@hotmail.fr)  
[zoko88@gmail.com](mailto:zoko88@gmail.com), [r\\_nait\\_said@hotmail.com](mailto:r_nait_said@hotmail.com), [ouzraoui@yahoo.fr](mailto:ouzraoui@yahoo.fr)

#### **Abstract**

BORA (Barrier and Operational Risk Analysis) is relatively new approach developed for qualitative and quantitative risk and safety barriers analysis. It includes a barrier block diagrams, fault trees (FT), and risk influence diagrams combined for analyzing accident scenarios that may occur on oil and gas industries and assessing safety barriers performance. This recent approach has been chosen because of its analysis of operational factors (human, technical and organizational factors) that contributed in these accidents. Furthermore, a close attention that is given to safety barriers analysis. In fact, it allows analyzing the major accident scenarios and the performance of all safety barriers existing and opposing the occurrence of these scenarios. For this reason, the qualitative and quantitative analysis using barrier block diagrams and fault tree analysis (FTA) are applied, followed by influence diagram analysis, the effects of risk influencing factors (RIFs) on the initiating and basic events in the fault trees.

In the context of BORA, expert judgment plays an important role in quantifying the revised probabilities of failure on demand of safety barriers considering average probabilities of failure on demand  $P_{ave}$  ( $E$ ) by aggregating weights ( $W_i$ ) and scores ( $Q_i$ ) for each RIF. When the judgments of multiple experts are elicited, mathematical aggregation methods can then be used to combine these individual judgments into a single judgment for calculating the  $P_{FDrev}$ . Using these methods, the risk analysts are able to combine these judgments in order to make better evaluation/decision about performance of safety barriers on terms of reliability, availability, effectiveness, response time and confidence level...etc.

As known, three categories of aggregation methods are evoked by researchers and scientists and carried out in different fields. Namely, conjunctive methods, compromise methods and disjunctive methods. Notes that, each method is selected taking into account the nature of opinions and data dissemination given by experts. These methods will be introduced and compared through following sections.

In the extant literature, many works were developed in the context BORA approach. A whole series of papers were submitted by Skelt et al, where they have proposed this approach then applied it as "BORA-Release" which was intended for qualitative and quantitative risk analysis of hydrocarbon releases to prevent releases on offshore oil and gas production platforms. In these papers, the expert judgment is made using one expert who is considered as reliable while it is not sufficient to account on one expert to judge these situations.

4 [Bourareche et al. 2020]

# Improving barrier and operational risk analysis (BORA) using criticality importance analysis case study: oil and gas separator

Mouloud Bourareche and Rachid Nait Said

LRPI Laboratory, Institute of Health and Industrial Safety, University of Batna 2, Algeria

Fatiha Zidani

LSPIE Laboratory, Faculty of Technology, University of Batna 2, Algeria, and

Nouara Ouazraoui

LRPI Laboratory, Institute of Health and Industrial Safety, University of Batna 2, Algeria

## Abstract

**Purpose** – The purpose of this paper is to show the impact of operational and environmental conditions (risk influencing factors) on the component criticality of safety barriers, safety barrier performance and accidents frequency and therefore on risk levels.

**Design/methodology/approach** – The methodology focuses on the integration of criticality importance analysis in barrier and operational risk analysis method, abbreviated as BORA-CIA. First, the impact of risk influencing factors (RIFs) associated with basic events on safety barrier performance and accident frequency is studied, and then, a risk evaluation is performed. Finally, how unacceptable risks can be mitigated regarding risk criteria is analyzed.

**Findings** – In the proposed approach (BORA-CIA), the authors show how specific installation conditions influence risk levels and analyze the prioritization of components to improve safety barrier performance in oil and gas process.

**Practical implications** – The proposed methodology seems to be a powerful tool in risk decision. Ordering components of safety barriers taking into account RIFs allow maintenance strategies to be undertaken according to the real environment far from average data. Also, maintenance costs would be estimated adequately.

**Originality/value** – In this paper, an improved BORA method is developed by incorporating CIA. More precisely, the variability of criticality importance factors of components is used to analyze the prioritization of maintenance actions in an operational environment.

**Keywords** Risk evaluation, BORA, Criticality importance analysis (CIA), Risk influencing factors (RIFs), Safety barrier performance

**Paper type** Research paper

## 1. Introduction

Since their existence, gas and oil industries were considered as a source of major accidents that could impact human, assets and the environment in a catastrophic way (Chettouh et al., 2018). Feedback from these accidents indicates clearly that during the accident scenarios manifestation, safety barriers are not functioning sufficiently well to control the generated dangerous situations (Hefaidh et al., 2019; Bucelli et al., 2018). That being said, the need for checking the ability of safety barriers in reducing accident occurrence and/or severity became a major concern of managers and risk analysts (Ait-Ouffroukh et al., 2018; Kang et al., 2016).

For that need, several qualitative, semi-quantitative and quantitative methods have been developed and applied for assessing risks and safety barrier performance in process industries according to their suitability to the studied system (Sklet, 2006a). Among these methods are hazard and

operability study (HAZOP) (IEC 61882, 2016b), fault tree analysis (FTA) (IEC 61025, 2016a), event tree analysis (ETA), layer of protection analysis (LOPA) (CCPS, 2001) and barrier and operational risk analysis (BORA).

The BORA is a relatively new method originally dedicated to risk analysis and safety barrier performance (Sklet and Haugen, 2004; Aven et al., 2006a; Haugen et al., 2010). BORA combines both qualitative and the quantitative levels of risk analysis and safety barriers, such as FTA and ETA, and introduces the risk influencing factors (RIFs). More precisely, it considers safety barriers and shows how technical, human and organizational factors influence their performance. Indeed, it is a powerful tool for analyzing RIFs, which may have an impact on the failure of safety barriers and the occurrence of accidents. Within the framework of BORA, a “BORA-Release” is developed to deal with qualitative and quantitative risk analysis of hydrocarbon releases (Sklet et al., 2006). Case studies have been devoted to hydrocarbon releases on offshore oil and gas production

The current issue and full text archive of this journal is available on Emerald Insight at: <https://www.emerald.com/insight/1708-5284.htm>



World Journal of Engineering  
17/2 (2020) 267–282  
© Emerald Publishing Limited [ISSN 1708-5284]  
[DOI 10.1108/WJE-04-2019-0129]

This work is part of a research project supported by the Ministry of Higher Education and Scientific Research in Algeria (under number no. A22N01UN050120150002).

Received 26 April 2019  
Revised 24 December 2019  
Accepted 21 January 2020