UNIVERSITE DE BATNA -2- MOSTEFA BEN BOULAÏD

Institut Hygiène et Sécurité

Laboratoire de Recherche en Prévention Industrielle (LRPI)

THÈSE

Présentée pour l'obtention du grade de

DOCTEUR EN SCIENCES

En

Hygiène et Sécurité Industrielle

Option Gestion des Risques

Par

Mme Samia DAAS

Contribution à l'Evaluation de la Performance des Plans de Réponse aux Catastrophes Industrielles dans un Environnement Incertain. Application au Plan Interne d'Intervention des Entreprises Pétrolières Algériennes

Soutenue publiquement le 09/ 03/ 2024 devant le jury composé de :

Mr. BOURMADA Noureddine	Professeur	Université de Batna 2, Algérie	Président
Mr. INNAL Fares	Professeur	Université de Skikda, Algérie	Rapporteur
Mr. ZENNIR Youcef	Professeur	Université de Skikda, Algérie	Examinateur
Mr. CHEBILA Mourad	MCA	Université de Batna 2, Algérie	Examinateur

2023/ 2024

بسم الله الرحمن الرحيم

Dédicaces

À mes adorables enfants,

À mon mari,

À mes chers parents et à toute la famille,

Pour leur soutien, leur encouragement et leur amour.

M^me^ DAAS Samia

Remerciements

Tout d'abord, j'exprime ma plus sincère et profond gratitude et mes remerciements à « Allah » Tout-Puissant, qui m'a donné la force, le courage et la patience pour pouvoir enfin accomplir ce travail à terme.

Je désire mes profonds remerciements à mon encadreur Monsieur INNAL Fares, Professeur à l'Institut des Sciences et Technique Appliquées, Université de Skikda, pour tous ses précieux conseils, pour son aide, sa patience et ses encouragements tout au long de ce travail. Ses compétences extraordinaires ont été un atout à la réussite de ces travaux et m'a permis d'apprendre énormément sur la recherche scientifique durant ces années de collaboration.

Je tiens également à remercier Monsieur BOURMADA Noureddine, Professeur à l'Institut d'Hygiène et Sécurité, université de Batna 2, pour l'honneur qu'il m'accorde en acceptant de présider le jury de cette thèse.

Je voudrais aussi témoigner ma gratitude aux Messieurs ZENNIR Youcef, Professeur à l'université de Skikda, et CHEBILA Mourad, Maitre de Conférences (A) à l'université de Batna 2, pour avoir bien voulu me faire l'honneur d'examiner ce travail et de participer à ce jury.

Je remercie également tous mes collèges et personnel de l'institut d'Hygiène et Sécurité et aussi mes collègues du département génie industriel de l'université de Batna 2.

Je remercie tous les cadres de Sonatrach DP, mes collègues de l'industrie de Hassi Messaoud.

Je remercie infiniment mon mari pour ses aides précieuses, sa compréhension et ses encouragements réguliers.

Enfin, je tiens à remercier tous ceux qui ont contribué à la réalisation de ce travail de thèse.

Merci à toutes et à tous.

Résumés

Contribution à l'évaluation de la performance des plans de réponse aux catastrophes industrielles dans un environnement incertain. Application au plan interne d'intervention des entreprises pétrolières Algériennes

Résumé - Les incendies et explosions liés aux stockages et traitement des hydrocarbures sont provoqués par des fuites non contrôlées de liquides et de gazes, d'une part, et la défaillance des barrières de sécurité associées, d'autre part. Ces accidents peuvent être fortement réduits en installant des barrières de sécurité fiables et efficaces. Dans le cadre de ce travail doctoral, nous avons tenté de surmonter les incertitudes liés à la subjectivité des experts dans l'estimation des probabilités de défaillances des barrières de sécurité et dans la priorisation des actions correctives visant leur amélioration. Une méthodologie de recherche est proposée à cet effet.

Nous avons d'abord proposé une méthodologie basée sur la théorie des ensembles flous intégrée à la méthode multicritères AHP et des techniques d'agrégation pour évaluer la probabilité de défaillance des barrières de sécurité d'urgence. L'identification de la barrière la moins fiable fait partie des objectifs de la démarche proposée. Ensuite, toujours dans le cadre cette première méthodologie, une extension de l'analyse par arbre des événements est proposée sous le nom d'analyse d'arbre des événements d'urgence pour l'estimation des fréquences d'occurrences des scénarios d'accidents.

Ensuite, une deuxième démarche est proposée dans l'objectif d'améliorer la barrière de sécurité critique identifiée précédemment. Le premier volet de cette démarche est l'analyse des modes de perturbations des différents composants de la barrière de sécurité à l'aide d'une extension de la méthode AMDEC nommée « *analyse des modes de perturbations, de leur effet et de leur criticité* » (AMPEC). La méthode AHP floue est ensuite proposée afin d'hiérarchiser les impacts de ces perturbations sur le personnel, l'environnement, le public et sur la production. Le deuxième volet concerne l'évaluation de la probabilité de défaillance de la barrière de sécurité d'urgence en se fondant sur l'usage des AdD et une technique nommée «*opérateur de la moyenne pondérée ordonnée incertaine dépendante amélioré*», permettant l'estimation des probabilités des événements de base. L'identification des événements de base critiques est réalisée à l'aide de deux facteurs d'importance usuels, à savoir le facteur de réduction de risque (RRW) et le facteur de Fussell-Vesely (FV). Puis, le troisième volet concerne la mise à profit d'une procédure basée sur l'analyse subjective de la sécurité et la théorie du raisonnement probant afin de prioriser les actions correctives en fonction de leur impact sur les événements de base critiques et donc sur l'efficacité de la barrière de sécurité considérée.

Finalement, une étude de cas sur les barrières de sécurité relatives à une sphère de stockage de GPL a été conduite pour illustrer les différentes démarches proposées. Les résultats obtenus montrent la faisabilité et l'efficacité de ces différentes propositions méthodologiques.

Mots-clés. Fiabilité, théorie des ensembles flous, analyse par arbre des évènements d'urgence, méthode AMPEC, Arbre des défaillances, Méthode AHP.

ملخص

المساهمة في تقييم أداء خطط الاستجابة للحوادث الصناعية في بيئة غير مؤكدة.
تطبيق على خطة التدخل الداخلي لشركات النفط الجزائرية

ملخص. تنجم الحرائق والانفجارات التي لها علاقة بتخزين غاز البترول المسال أساسا عن تسرب الغاز والتدهور الوظيفي لحواجز الأمان. ومع ذلك فان الغرض من هذه الدراسة هو تقييم مدى موثوقية حواجز السلامة في السيطرة على الحوادث الصناعية لمساعدة صناع القرار في اتخاذ القرارات التي تهدف الى الحد من المخاطر المرتبطة بتخزين غاز البترول المسال. لهذا هذه الدراسة تقترح منهجية بحث لهاذا الغرض. هذه الدراسة تقترح تغيير طريقة تحليل شجرة الاحداث تحت اسم شجرة احداث الطوارئ. الهدف من هذه الدراسة هو تطوير نهج متكامل يستخدم المجموعة الغامضة من النوع الثاني وطريقة عملية التحليل الهرمي وتحليل شجرة الاحداث الطوارئ ومن ناحية أخرى تحديد حاجز السلامة الذي يمكن التغيير من موثوقيته. ولذلك يقترح امتداد لطريقة تسمى تحليل أوضاع الاضطراب وتأثيرها وخطورتها من اجل تحليل أوضاع الاضطراب للمكونات المختلفة لنظام مكافجة الحرائق الألى. تم اقتراح طريقة التحليل الهرمي الغامضة من اجل تحديد أولويات تأثيرات اضطراب نظام مكافجة الحرائق الألى على الموظفين والبيئة والساكنة والإنتاج. أيضا تم اقتراح نهج متكامل يعتمد على نظرية المجموعة الغامضة ومشغل متوسط مرجح غير مؤكد ومحسن وتحليل شجرة الأخطاء لإدارة عدم اليقين في تقييم مدى توفر نظام مكافجة الحرائق الألى. يتم استخدام طريقة مركز المنطقة لإزالة ضبابية الأرقام الغامضة. بالإضافة الى ذلك بالنسبة لشجرة أخطاء نظام مكافجة الحرائق الألى يتم اجراء تحليل الأهمية بما في ذلك مقياس أهمية فوسل فسلى والقيمة الأساسية لتقليل مخاطر الحدث لتحديد الروابط الضعيفة في نظام مكافجة الحرائق الألى وتحقيقا لهذه الغاية بتم اقتراح الإجراءات التصحيحية. لذلك يتم تخصيص التحسين لتحديد الاجراء التصحيحي الأكثر امانا ة الذي من شانه تحسين موثوقية نظام مكافجة الحرائق الألى. يقترح التحليل الذاتي لسلامة مجموعة الإجراءات التصحيحية بناء على نظرية الاستدلال القاطع. يتم تقديم دراسة حالة حول حواجز السلامة المتعلقة بتخزين غاز البترول المسال في الجزائر لتوضيح فعالية المنهجية المقترحة. وتظهر النتائج المحصل عليها فعالية وجدوى المنهجية المقترحة. هذه الدراسة تعتبر مرجع لتحليل حواجز السلامة في نظام أكثر تعقيدا.

الكلمات المفتاحية. موثوقية -المجموعة الغامضة من النوع الثاني -تحليل شجرة الاحداث الطوارئ - طريقة تحليل أوضاع الاضطراب وتأثيرها وخطورتها -شجرة أخطاء -طريقة التحليل الهرمي.

Abstract

Contribution to the evaluation of the performance of industrial disaster response plans in an uncertain environment.
Application to the Internal Intervention Plan of Algerian Oil Companies

Abstract - Fires and explosions related to the storage and processing of hydrocarbons are mainly caused by the uncontrolled leakage of liquids and gases on the one hand and the failure of safety barriers on the other. These accidents can be greatly reduced by installing reliable and effective safety barriers. As part of this doctoral work, we tried to deal the uncertainties related to subjectivity in assessing the probabilities of safety barrier and prioritizing corrective actions aimed at improving them. A research methodology is proposed for this purpose.

We first proposed a methodology based on fuzzy set theory combined with the AHP multi-criteria method and the aggregation method to estimate the probability of failure of emergency safety barriers. Determining the most reliable safety barrier is one of the objectives of the proposed approach. Then, in this first methodology, it is proposed to extend event tree analysis in the name of emergency event tree analysis to estimate the frequency of accident scenarios.

We then proposed a second approach to improve the previously identified critical safety barrier. The first part of this approach is to analysis the modes of disturbance of the different components of the safety barrier using an extension of the FMECA method called “analysis of the modes of disturbance, their effect and their criticality” (DMECA). Subsequently, a fuzzy AHP method is proposed to prioritize the impacts of these disturbances on personnel, the environment, the public and production. The second part concerns the estimation of the failure probability of the safety barrier based on the use of AdD and a technique called "improved dependent uncertain ordered weighted average operator", allowing the estimation of the probabilities of the basic events. Critical basic events are identified using two common importance factors, namely the Risk Reduction Factor (RRW) and the Fussell-Vesely Importance Factor (FV). The third part then refers to the use of a procedure based on subjective safety analysis and the evidential reasoning theory in order to prioritize corrective measures according to their impact on critical basic events and thus on the effectiveness of the considered safety barrier.

Finally, a case study of safety barriers related to an LPG storage area was conducted to illustrate the different proposed approaches. The obtained results show the feasibility and effectiveness of these different methodological proposals.

Keywords - Reliability, fuzzy set theory type, Emergency Event Tree Analysis, DMECA method, Fault Tree Analysis, AHP method.

Table des matières

Dédicaces…… ii

Remerciments…….. iii

Résumes……... iv

Table des matiéres……..... vii

Liste des figures……... xi

Liste des figures annexe D…….. xv

Liste des tableaux…… xvi

Nomenclature et acronoymes…….. xix

Introduction génerale…… 1

1. Problématique……. 1
2. Objectifs de l'étude……. 3
3. Structure de la thése…… 4

Chapitre 1. Gestion des risques et maitrise des accidents industriels……... 7

1.1. Introduction……... 8

1.2. Risques et accidents industriels……. 8

1.2.1. Conepts et définitions…… 8

1.2.1.1. Risque…… 8

1.2.1.2. Mesure du risque……... 9

1.2.1.3. Vulnérabilité…….. 13

1.2.2. Démarche de gestion des risques…….…….. 14

1.2.2.1. Identification du risque…….. 15

1.2.2.2. Analyse du risque……...… 15

1.2.2.3. Evaluation du risque…….. 16

1.2.3. Méthodes d'appréciation des risques…… 20

1.2.3.1. Méthode HAZOP……... 17

1.2.3.2. Analyse par arbre des évenements (AdE)……..... 18

1.3. Maitrise des accidents industriels……. 20

1.3.1. Définition de l'accident industriel majeur……. 20

1.3.2. Analyse statistique sur les accidents industriels en Algérie…….. 21
1.3.2.1. Statistique des accidents industriels à l'echelle mondiale…… 21
1.3.2.2. Statistiques des accidents industriels en Algérie…….. 24
1.3.3. Dispositifs réglementaires de la gestion des accidents industriels en Algérie……... 26
1.3.4. Les modeles des barriéres de sécurité……... 27
1.3.4.1. Modele de défence en profendeur……..... 27
1.3.4.2. Modele du nœud papillon……. 28
1.3.4.3. Modele LOPA…….. 29
1.4. Performance des barriéres de sécurité……... 31
1.4.1. Concepts et définitions…….. 31
1.4.1.1. Barriére de sécurité……..….. 31
1.4.1.2. Système de barriére…….. 32
1.4.2. Classification des barriéres de sécurité……. 32
1.4.2.1. Classification des barriéres de sécurité selon leur nature……..… 32
1.4.2.2. Classification des barriéres de sécurité selon leur fonction……. 34
1.4.3. Critéres d'évaluation de la performance des barriéres de sécurité…… 35
1.5. Conclusion…… 36
Chapitre 2. Evaluation de la probabilité de défaillance floue des barriéres de sécurité d'urgence…… **38**
2.1. Introduction…….. 39
2.2. Description de la méthodologie proposée…… 39
2.3. Problématique de l'incertitude dans la maitrise des accidents industriels…… 40
2.4. Théories des ensembles floues pour le traitement de l'incertitude……... 42
2.4.1. Théorie des ensembles flous type 1…… 42
2.4.2. Théorie des ensembles flous type 2…… 45
2.4.3. Theorie des ensembles flous intuitionnistes…… 47
2.5. Jugement d'experts et méthodes d'aggrégations…….. 48
2.5.1. Jugement d'experts……. 49
2.5.1.1. La méthode AHP……. 49
2.5.1.2. Méthode AHP floue type 2……. 52
2.5.2. Méthodes d'aggrégations…… 54
2.5.2.1. Méthode de procédure d'aggrégation……..... 55
2.5.2.2. Méthode d'aggrégation de similarité…….. 57
2.6. Calcul de la probabilité de défaillance floue…… 61

2.7. Calcul de la fréquence d'occurrence des conséquences d'urgences……. 62
2.8. Conclusion……..... 63
Chapitre 3. Optimisation de la fiabilité des barriéres de sécurité d'urgence…….. 64
3.1. Introduction…….. 65
3.2. Description sommaire de la méthodologie proposée…… 65
3.3. Hiérarchisation des facteurs de risque…….. 67
3.3.1. Evaluation des modes de perturbations par la méthode AMPEC……. 68
3.3.2. Hiérarchisation des facteurs de risque par la méthode AHP floue…… 70
3.4. Evaluation de la disponibilité des barriéres de sécurité d'urgence à l'aide des AdD…….. 72
3.4.1. Revue de littérature…….. 72
3.4.2. Construction et exploitation des évenements de base par les experts…….. 73
3.4.3. Estimation des probabilités des évenements de base par les experts…… 74
3.4.4. Evaluation de la probabilité de l'évenement sommet……... 77
3.4.5. Analyse de sensibilité…… 78
3.5 Analyse subjectives de la sécurité des actions correctives à l'aide de la théorie du raisonnement probant…….. 79
3.5. Conclusion…… 81
Chapitre 4. Etude de cas sur l'unité de stockage GPL, Hassi Messaoud……. 82
4.1. Introduction…….. 83
4.2. Description de l'unité GPL (Hassi Messaoud)……. 83
4.3. Analyse des risques liés aux stockages de GPL……... 85
4.4. Evaluation de la probabilité de défaillance floue des barriéres de sécurité…….. 88
4.5. Evaluation de la disponibilité du système automatique de lutte contre l'incendie... 93
4.5.1. Analyse dusfonctionnelle de la barriére de sécurité « système automatique de lutte contre l'incendie» par la méthode AMPEC…… 95
4.5.2. Développement de l'arbre des défaillances…… 100
4.5.2.1. Evaluation des probabilités des évenements de base…… 100
4.5.2.2. Evaluation de la probabilité de lévenement sommet…… 108
4.6. Analyse de sensibilité……... 109
4.7. Optimisation de la fiabilité de la barriére de sécurité d'urgence « système automatique de lutte contre l'incendie»…… 110
4.8. Conclusion…… 111
Chapitre 5. Discussion des résultats…… 112
5.1. Introduction…….. 113

5.2. Présentation et discussion des résultats relatifs aux probabilités de défaillance floue des barriéres de sécurité d'urgence…… 113
5.3. Résultats numériques relatifs aux fréquences des conséquences d'urgences…….. 120
5.4. Résultats numériques relatifs à l'optimsation de la fiabilite de la barriére BS2…… 125
5.5. Conclusion…… 131
Conclusion génerale…….. 133
Références bibliographiques…… 135
Travaux de recherches publiés……. 151
Conférences internationales…….. 156
Annexe A. Directive européennes SEVESO iii……... 157
Annexe B. Fuzzy set theory type 2 in Matlab Software: AHP method……. 158
Annexe C. Aggregation of intuitionnistic fuzzy set by using the Matlab Software. 159
Annexe D. Analyse bibliométrique sur l'application de l'arbre de défaillance…… 160

Liste des figures

		Page
Figure 1.1	Diagramme Fréquence- Gravité.	10
Figure 1.2	Matrice d'évaluation du risque en fonction de la probabilité et de la gravité.	11
Figure 1.3	Les paramètres essentiels de la réduction des risques industriels.	12
Figure 1.4	La réduction du risque sociétal.	13
Figure 1.5	Model d'accident "flux de danger".	14
Figure 1.6	Processus de gestion des risques industriels.	15
Figure 1.7	Exemple illustratif d'un arbre d'évènement.	19
Figure 1.8	Les niveaux de gravité des accidents.	20
Figure 1.9	Nombres des catastrophes industrielles dans le monde par an.	21
Figure 1.10	Nombre des accidents et décès dans l'industrie pétrolière et gazière.	24
Figure 1.11	Répartition des accidents industriels survenus au niveau de la division de production de Sonatrach à Hassi Messaoud.	24
Figure 1.12	Distribution des accidents industriels selon le type de phénomène.	25
Figure 1.13	Répartition des accidents industriels impliquant une substance dangereuse.	26
Figure 1.14	Modèle de Reason.	28
Figure 1.15	Modèle du nœud papillon (NP).	29
Figure 1.16	Correspondance entre le principe LOPA et l'AdE.	30
Figure 1.17	Les couches de protection suivant le modèle LOPA.	30
Figure 1.18	Typologie des barrières de sécurité.	33
Figure 1.19	Exemple d'identification des fonctions que doivent remplir des barrières de sécurité.	34
Figure 1.20	Les critères de la performance des barrières de sécurité.	35
Figure 2.1	La méthodologie proposée pour l'évaluation de la probabilité de défaillance floue des barrières de sécurité d'urgence.	40
Figure 2.2	Différentes Fonctions d'appartenance.	43
Figure 2.3	Les différents opérations de deux ensembles flous A et B.	44
Figure 2.4	La fonction d'appartenance de l'ensemble flou de type 2.	45

Figure 2.5	Nombre flou intuitionniste.	47
Figure 2.6	La structure hiérarchique de la méthode Analytic Hierarchy Process.	49
Figure 2.7	Normalisation de la matrice et calcul du vecteur de pondération.	51
Figure 2.8	Illustrative numérique de normalisation de la matrice et calcul du vecteur de pondération.	51
Figure 2.9	Exemple numérique sur le calcul de IA et RC.	52
Figure 2.10	Les étapes de la procédure d'agrégation floue.	56
Figure 2.11	Exemple illustrative sur la méthode de procédure d'agrégation.	57
Figure 2.12	Exemple illustrative pour la méthode d'agrégation de similarité.	60
Figure 2.13	Extension d'un arbre d'évènement.	62
Figure 3.1	La méthodologie proposée pour l'optimisation de la fiabilité des barrières de sécurité.	66
Figure 3.2	Démarche de la hiérarchisation des facteurs du risque.	68
Figure 3.3	Portes logiques « Et » et « Ou » reliant des événements de base.	73
Figure 3.4	Représentation graphique des fonctions d'appartenance du nombre flou.	75
Figure 4.1	Vue 3D de l'unité GPL.	84
Figure 4.2	Schéma simplifié de la sphère de stockage GPL.	85
Figure 4.3	Arbre d'événement classique des scénarios d'accidents dans la zone de stockage de GPL.	87
Figure 4.4	Matrice du risque de l'unité GPL.	88
Figure 4.5	Système AHP pour l'évaluation d'experts.	89
Figure 4.6	Analyse d'arbre des événements d'urgence de la grande fuite de GPL.	92
Figure 4.7	Organigramme simplifié du système automatique de lutte contre l'incendie du stockage de GPL.	94
Figure 4.8	Résultats du questionnaire pour la détermination de la valeur seuil de nombre de priorité du risque (NPR).	95
Figure 4.9	Structure hiérarchique du mode de perturbation « échec d'ouverture à la demande ».	97
Figure 4.10	AdD relatif au système automatique de lutte contre l'incendie.	101
Figure 5.1	Comparaison des valeurs de probabilité de défaillance floue et la fiabilité des barrières de sécurité d'urgence par le nombre flou traingulaire et à l'aide des méthodes AHP, AHP floue et AHP floue type 2.	116

Figure 5.2	Comparaison des valeurs de probabilité de défaillance floue et la fiabilité des barrières de sécurité d'urgence par le nombre flou trapézoidal et à l'aide des méthodes AHP, AHP floue et AHP floue type 2.	116
Figure 5.3	Comparaison des valeurs de probabilité de défaillance et la fiabilité des barrières de sécurité d'urgence par le nombre flou traingulaire et à l'aide des méthodes AHP, AHP floue et AHP floue type 2.	117
Figure 5.4	Comparaison des valeurs de probabilité de défaillance et la fiabilité des barrières de sécurité d'urgence par le nombre flou trapézoidal et à l'aide des méthodes AHP, AHP floue et AHP floue type 2.	117
Figure 5.5	Comparaison des valeurs de probabilité de défaillance floue et la fiabilité des barrières de sécurité d'urgence par le nombre flou intuitionniste triangulaire et à l'aide des méthodes AHP, AHP floue et AHP floue type 2.	118
Figure 5.6	Comparaison des valeurs de probabilité de défaillance et la fiabilité des barrières de sécurité d'urgence par le nombre flou intuitionniste triangulaire et à l'aide des méthodes AHP, AHP floue et AHP floue type 2.	119
Figure 5.7	Fréquences des conséquences d'urgence obtenues à l'aide des méthodes AHP, AHP flou et l'AHP flou type 2.	123
Figure 5.8	Fréquences des scénarios d'urgence obtenues en fonction de la probabilité de défaillance et par les méthodes AHP, AHP flou et l'AHP flou type 2.	123
Figure 5.9	Fréquences des scénarios d'urgence obtenues en fonction de nombre flou intuitionniste triangulaire et par les méthodes AHP, AHP flou et l'AHP flou type 2.	124
Figure 5.10	Fréquences d'occurrence des scénarios d'accident initiés par une fuite de GPL.	125
Figure 5.11	Comparaison des scores des facteurs de risque en utilisant les méthodes AHP et AHP floue.	126
Figure 5.12	Poids des experts relatifs au facteur du risque personnel.	127
Figure 5.13	Poids des experts relatifs au facteur du risque environnemental.	127
Figure 5.14	Poids des experts relatifs au facteur du risque public.	127
Figure 5.15	Poids des experts relatifs au facteur du risque production.	128

Figure 5.16	Comparaison entre les valeurs des probabilités de défaillance calculées par le nombre flou trapézoïdal et triangulaire.	129
Figure 5.17	Valeurs des fiabilités calculées par les nombres flous trapézoïdal et triangulaire.	129
Figure 5.18	Valeurs de réduction de risque (RRW) calculées par les nombres flous trapézoïdal et triangulaire.	130
Figure 5.19	Classement des scores de la sécurité des actions correctives relatives à "EB_2".	131

Liste des figures annexe D

		Page
Figure D.1	Nombre des publications relatives à l'arbre de défaillance entre la période de 1973- 2022.	160
Figure D.2	Travaux de recherche publiés relative à l'arbre de défaillance entre la période 1973-2022	161
Figure D.3	Force total des liens en fonction des travaux moyenne publiés /an dans la période de 1973- 2022.	162
Figure D.4	Force total des liens en fonction de citation moyenne des travaux publiés /an dans la période de 1973- 2022.	163
Figure D.5	Documents publiés en fonction de citation moyenne /an dans la période de 1973- 2022.	163
Figure D.6	Occurrence des mots clés publié en fonction des travaux moyenne publiés /an dans la période de 1973- 2022.	164

Liste des tableaux

		Page
Tableau 1.1	Principaux mots-guides.	18
Tableau 1.2	Feuille HAZOP.	18
Tableau 1.3	Recueil des accidents industriels survenus dans le monde entre 2004-2021.	22
Tableau 2.1	Echelle de Saaty.	50
Tableau 2.2	Les Indices Aléatoire (IA).	52
Tableau 2.3	Définition et intervalle des échelles floues de type 2 des variables linguistiques.	54
Tableau 2.4	Echelle des nombres flous intuitionniste triangulaire.	55
Tableau 2.5	Fonctions d'appartenance d'un nombre flou trapézoïdal.	58
Tableau 2.6	Coefficients de pondération des experts.	59
Tableau 3.1	Classification de la probabilité d'occurrence des modes de perturbations.	69
Tableau 3.2	Classification de l'impact des modes de perturbations.	69
Tableau 3.3	Classification de la détection des modes de perturbations.	70
Tableau 3.4	Classement du nombre de priorité du risque (NPR).	70
Tableau 3.5	Interprétation des entités dans une matrice de comparaison par paires.	71
Tableau 3.6	Fonctions d'appartenance des nombres triangulaires flous.	74
Tableau 3.7	Fonctions d'appartenance des nombres trapézoïdaux flous.	75
Tableau 3.8	Exemples des mesures d'importance.	79
Tableau 3.9	Expressions de sécurité.	80
Tableau 4.1	Extrait de l'étude HAZOP de la zone de stockage GPL.	86
Tableau 4.2	Probabilité d'occurrence des évènements liés à la perte de confinement.	87
Tableau 4.3	Fréquence d'occurrence des scénarios catastrophiques.	87
Tableau 4.4	Caractéristiques des experts.	88
Tableau 4.5	Jugements des experts pour les barriers de sécurité d'urgence.	91
Tableau 4.6	Valeurs de defuzzification du nombre flou trapézoïdal.	91

Tableau 4.7	Classement de la probabilité de défaillance floue des barrières de sécurité d'urgence.	92
Tableau 4.8	Extrait de l'étude AMPEC du système automatique de lutte contre l'incendie relatif aux sphères de stockage GPL.	96
Tableau 4.9	Matrice de comparaison entre les facteurs du risque.	98
Tableau 4.10	Moyennes géométriques des valeurs de comparaison floues.	98
Tableau 4.11	Poids flou et meilleure performance non floue de chaque critère.	98
Tableau 4.12	Agrégation des résultats pour chaque alternative en fonction des facteurs du risque.	99
Tableau 4.13	Description des événements de base, intermédiaires et de l'événement sommet.	102
Tableau 4.14	Jugements et opinions des experts concernant les probabilités des événements de base.	104
Tableau 4.15	Les calculs d'agrégations pour l'événement de base"BE_1".	105
Tableau 4.16	Possibilités de défaillances nettes et probabilité de défaillance calculées par le nombre flou trapézoïdal.	106
Tableau 4.17	Possibilités de défaillances nettes et probabilités de défaillances calculées par le nombre flou triangulaire.	107
Tableau 4.18	Valeurs de probabilité de défaillance des portes logiques.	108
Tableau 4.19	Classement des évènements de base selon le facteur d'importance RRW.	109
Tableau 4.20	Actions correctives potentielles proposées.	110
Tableau 4.21	Valeurs du score de sécurité des actions correctives (ACs).	111
Tableau 5.1	Comparaison des valeurs de probabilité de défaillance floue des barrières de sécurité d'urgence par le nombre flou triangulaire.	114
Tableau 5.2	Comparaison des valeurs de probabilité de défaillance floue des barrières de sécurité d'urgence par le nombre flou trapézoïdal.	114
Tableau 5.3	Comparaison des valeurs de probabilité de défaillance des barrières de sécurité d'urgence par le nombre flou triangulaire.	114
Tableau 5.4	Comparaison des valeurs de probabilité de défaillance des barrières de sécurité d'urgence par le nombre flou trapézoïdal.	115
Tableau 5.5	Comparaison des valeurs de probabilité de défaillance flou des barrières de sécurité d'urgence par le nombre flou intuitionniste triangulaire.	115

Tableau 5.6	Comparaison des valeurs de probabilité de défaillance des barrières de sécurité d'urgence par le nombre flou intuitionniste triangulaire.	115
Tableau 5.7	Fréquences d'occurrence des conséquences d'urgences en cas feu de nappe en fonction de la probabilité de défaillance floue et le nombre flou triangulaire.	120
Tableau 5.8	Fréquences d'occurrence des conséquences d'urgences en cas feu de nappe en fonction de la probabilité de défaillance floue et le nombre flou trapézoïdal).	120
Tableau 5.9	Fréquences d'occurrence des conséquences d'urgences en cas feu de nappe en fonction de la probabilité de défaillance et le nombre flou triangulaire.	121
Tableau 5.10	Fréquences d'occurrence des conséquences d'urgences en cas feu de nappe en fonction de la probabilité de défaillance et le nombre flou trapézoïdal.	121
Tableau 5.11	Fréquences d'occurrence des conséquences d'urgences en cas feu de nappe en fonction de la probabilité de défaillance floue et le nombre flou intuitionniste triangulaire.	121
Tableau 5.12	Fréquences d'occurrence des conséquences d'urgences en cas feu de nappe en fonction de la probabilité de défaillance et le nombre flou intuitionniste triangulaire.	122
Tableau 5.13	Fréquences d'occurrence des scénarios d'accidents initiés par une grande fuite de GPL.	125
Tableau 5.14	Extrait des valeurs de facteur d'importance de Fussell-vesely (FV) calculées par les nombres flous trapézoïdal et triangulaire.	130

Nomenclature et acronymes

Lettres

A	Aléa
G	Gravité
Pr	Probabilité
V	Vulnérabilité
I	Intensité/ impact.
$\mu_A(x)$	Fonction d'appartenance.
$\sup(A)$	Support d'un ensemble flou A.
$h(A)$	Hauteur d'un ensemble flou A.
$noy(A)$	Noyau d'un ensemble flou A.
$\tilde{\tilde{A}}$	Ensemble flou de type 2.
w_i	Vecteur de pondération.
A_{Nor}	Matrice A normalisé.
SL_i	Somme des lignes.
SC_j	Somme des colonnes.
$\tilde{\tilde{r}}_i$	Moyenne géométrique.
$\widetilde{\widetilde{w}}_i$	Poids flou.
$\tilde{P}_m$	Opinion de l'expert en termes de nombres flous.
$\tilde{P}_A$	Agrégation des nombres flous.
W_m	Poids de l'expert m.
$\tilde{C}$	Nombre floue trapézoïdal.
$S(\tilde{R}_i, \tilde{R}_j)$	Dégrée de similarité
SM	Matrice de similarité.
$S(E_i)$	Degré de similarité moyen.
RSD_i	Similarité relative de chaque expert
CDC_i	Coefficient de degré de consensus
P^*	Probabilité finale estimée
k	Variable intermédiaire

$F(EC_{1i})$	Fréquence occurrence/ an de conséquence d'urgence.
$F(C_1)$,	Fréquence d'occurrence des scenarios d'accident.
$R(t)$	Fiabilité.
F(t)	Défiabilité.
$A(t)$, $Q(t)$	Disponibilité
$U(t)$	Indisponibilité.
$M(t)$	Maintenabilité.
F	Fréquence.
D	Détection.
$\tilde{t}_{ij}$	Nombre flou trapézoïdal.
λ	Taux de défaillance.
τ	Paramètre de test périodique
t_0	Temps du premier test.
μ	Taux de réparation
$P_i(t)$	Probabilité de défaillance des évènements de base.
$P(t)$	Probabilité de défaillance de l'évènement du sommet.
$\tilde{P}_a$	Moyenne flou arithmétique
$d(\tilde{P}_k, \tilde{P}_a)$	Distance entre deux nombres flous.
ω_k	Poid final des experts
$P(BE_i)$	Probabilité de l'événement de base i, est la et est la
$P(MCS_j)$	Probabilité de l'ensemble de coupe minimal j
$P(TE)$	Probabilité de l'événement sommet
$I^{RRW}(i\|t)$	Valeur de la réduction des risques.
FV_i	Mesure d'importance de Fussell-vesely
$\boldsymbol{S_i}$	Score de sécurité.
$\boldsymbol{\mu_{S_i}}$	Description de la sécurité.
$d_{i1}(S_i, poor)$	Distance entre deux scores de sécurité.
AS_i^j	Somme moyenne pondérée du score d'agrégation.

Acronymes

ARAMIS	Accidental Risk Methodology for IndustrieS.
AIChE	American Institute of Chemical Engineers.
AC	Action Corrective

AdD	Analyse d'Arbre de Défaillance.
APR	Assessment Probabilities Risk.
AMDE	Analyse des Modes de Défaillance et de leur Effet.
AMDEC	Analyse des Modes de Défaillance, de leur Effet et de leur Criticité.
AMPEC	Analyse des Modes de Perturbation, de leur Effet et de leur Criticité.
AHP	Analytic Hierarchy Process.
ALARP	Low As Raisonnablement Praticable.
CU	Conséquence d'Urgence.
BNP	Best Non fuzzy Performance.
BT	Bow Tie.
EB	Evénement de Base.
E-BT	Emergency Bow Tie.
EI	Evènement Intermédiaire.
BS	Barrière de Sécurité.
BN	Bayesian Network.
BLEVE	Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion.
BIM	Mesure d'importance Marginale de Birnbaum.
CFP	Crisp Failure Possibility.
CIM	Mesure de l'importance de la criticité.
DIM	Mesure de l'importance différentielle.
DUOWA	Moyenne Pondérée Ordonnée Incertaine Dépendante.
DEMATEL	Decision Making Trial and Evaluation Laboratory.
FIS	Fonction Instrumenté de Sécurité.
FP	Failure Probability.
FR	Facteur du Risque.
FFP	Fuzzy Failure Probability.
FPS	Fuzzy Possibility Score.
FAHP	Fuzzy Analytic Hierarchy Process.
GPL	Gaz Pétrolière Liquéfié.
GNL	Gaz Natural liquéfié.
HAZOP	HAZard and Operability.
HHAZOP	Human HAZard and Operability.
HAZID	HAZard Identification.
IAOGP	International Association of Oil and Gas Producers.
IFV	Importance Fussell Vesely.

IEC	International Electrotechnical Commission.
IC	Indice de Cohérence.
IA	Indice Aléatoire.
IPL	Independant Protection Layer.
LOPA	Layer Of Protection Analysis.
LDHP	Ligne Directe de Haute Pression.
MADS	Méthodologie d'Analyse des Dysfonctionnements des Systèmes.
MTTF	Mean Time To Failure.
MTTR	Mean Time To Repair.
MUT	Mean Up Time.
MDT	Mean Dawn Time.
MTBF	Mean Time Between Failures.
NPR	Nombre de Priorité du Risque.
NaTech	Risque Naturel et Technologique.
NPF	Nœud Papillon Flou.
OREDA	Offshore and onshore Reliability DAta.
OptHAZOP	Optimal HAZard and Operability.
ORSEC	Organisation des SECours.
PhD	Phénomène Dangereux.
PID	Piping and Instrumentation Diagram.
PFDavg	Probability of Failure on Demand average.
PII	Plan Interne d'Intervention.
PPI	Plan Particulière d'Intervention.
QRA	Quantitative Risk Assessment.
RAMS	Reliability, Availability, Maintainability, Safety.
RC	Ration de Cohérence.
SCHAZOP	Safety Culture HAZard and Operability.

Introduction générale

1. Problématique

L'industrie pétrolière et gazière a connu une forte augmentation technologique ces dernières années, et donc un accroissement de la diversité et de la complexité des procédés et des équipements industriels. Ce développement a conduit à l'aggravation des impacts des accidents majeurs inhérents à ce type d'industrie. Ces accidents, tels que les incendies, les explosions (BLEVE, VCE, …) ainsi que des effets d'entraînement, ont de graves conséquences pour les personnes, les équipements, l'environnement et l'économie (Gomez *et al.*, 2008 ; Al-Shanini *et al.*, 2014 ; Zhang *et al.*, 2016).

Les zones de stockage de produits inflammables tels que le Gaz de Pétrole Liquéfié (GPL) avec leurs différents dispositifs, plus particulièrement les sphères de stockage sous pression, représentent un domaine où ces scénarios catastrophiques sont plus fréquents en raison de la présence de ces substances inflammables (Zarei *et al.*, 2017 ; Wu *et al.*, 2021). Par ailleurs, des études ont montré que les substances inflammables sont impliquées dans des accidents par effet domino (Khakzad *et al.*, 2013). Les incendies et les explosions dans les installations de stockage des produits inflammables se produisent à la suite de fuites de gaz incontrôlées et de la défaillance des barrières de sécurité associées. En plus de la sécurité inhérente et des mesures de sécurité supplémentaires pour prévenir ou contrôler ces accidents majeurs, des barrières de sécurité d'urgence (*emergency safety barrier*) efficaces jouent un rôle clé pour empêcher qu'un grand incendie ne provoque des incendies secondaires (Sun *et al.*, 2021).

Ces dernières années, il y a eu un certain nombre d'accidents à haut risque dans les zones pétrochimiques à travers l'Algérie (Chettouh *et al.*, 2016). Un exemple de l'accident du centre industriel de stockage de Skikda, survenu le 4 octobre 2005, est resté dans la mémoire comme une catastrophe industrielle ayant fait des morts et d'importants dommages matériels (Ait Ouffroukh *et al.*, 2018). A cet effet, et afin d'assurer la sécurité de ces installations dangereuses tout en respectant les objectifs de la prévention et la qualité des services, des barrières de sécurité efficace avec des exigences de fiabilité doivent être installées (Wingerden. *et al.*, 2000).

L'une des barrières de sécurité typique installée dans les zones de stockage des produits inflammables est les détecteurs gaz et feu (système F&G), les arrêts d'urgence et le système automatique de lutte contre l'incendie. Ce dernier système est considéré comme une barrière de sécurité d'urgence, capable de réduire la gravité des dommages causés par les scénarios

catastrophiques (Davies *et al.*, 2004 ; Guetarni *et al.*, 2019). Les barrières de sécurité d'urgence sont généralement prédéfinies dans l'industrie pétrolière et gazière pour assurer une mise en œuvre rapide, ordonnée et efficace des actions d'urgence. Elles peuvent être des dispositifs ou des actions individuelles ou un système complexe qui peuvent réduire la fréquence et les conséquences d'un accident (Bubbico *et al.*, 2020). D'une manière générale, les barrières de sécurité peuvent être utilisées pour prévenir les événements dangereux et atténuer les conséquences correspondantes (Sklet *et al.*, 2006 ; Landucci *et al.*, 2015 ; Chen *et al.*, 2019 ; Ovidi *et al.*, 2021 ; Xie *et al.*, 2021).

L'évaluation de la performance des barrières de sécurité trouve son origine dans le projet européen sur la méthodologie d'évaluation des risques accidentels pour l'industrie (ARAMIS) (Valerio *et al.*, 2009). Le projet a incorporé plusieurs méthodologies existantes telles que l'analyse des couches de protection (LOPA) et les diagrammes en nœud papillon. Par ailleurs, Ramzali *et al.*, (2015) utilisent des méthodes d'analyse par arbre d'événements (AdE), arbre de défaillances (AdD) et de schéma fonctionnel de fiabilité pour concevoir un système de barrière de sécurité adéquat. Notons que l'AdD est l'un des outils d'évaluation probabiliste des risques les plus importants et largement utilisés dans les applications industrielles. A ce titre, une étude récente de Ikwan *et al.*, 2021 a porté sur l'usage des AdD et la matrice des risques pour la prévision des risques en temps réel liées à un déversement de réservoir. Plus généralement, plusieurs méthodes ont été développées pour assurer une fiabilité maximale des barrières de sécurité en se basant sur l'évaluation de leur probabilité de défaillance (Zhou *et al.*, 2017 ; Khare *et al.*, 2019).

Toutefois, la pratique industrielle actuelle de ne tient pas pleinement compte de l'évaluation des performances des barrières de sécurité pour prévenir les accidents majeurs. A ce titre, il existe un large éventail de méthodologies de fiabilité et d'analyse des risques avec des propriétés à la fois qualitatives et quantitatives, comme détaillé dans (Khan *et al.*, 2015). Les descriptions qualitatives et graphiques sont insuffisantes pour la mise en œuvre des stratégies de prévention pratiques (Kang *et al.*, 2016). A cet effet, la mise en place d'une gestion des risques fondée sur l'analyse quantitative des risques (QRA) est nécessaire pour réduire la fréquence et/ou la gravité de scénarios d'accidents sur la base de l'analyse des résultats (Sarvestani *et al.*, 2021). Par ailleurs, la crédibilité de toute évaluation quantitative dépond largement de la qualité ou de la fiabilité des données qui s'y associent. Aussi, les données utilisées sont généralement absentes ou entachées d'incertitudes. Dans plusieurs cas de figures, l'usage d'une mesure précise des probabilités de défaillance, ou des paramètres permettant leurs calculs, est considéré comme peu pratique en raison des données insuffisantes et subjectives.

Cela requière donc la considération de ces incertitudes dans les études quantitatives, afin de renforcer la crédibilité des résultats obtenus et d'augmenter la confiance dans le processus de décision qui en découle. Rappelons que l'évaluation quantitative des risques dans l'industrie pétrolière et gazière, surtout en Algérie, est basée sur des procédures et des méthodes comme la méthode HAZOP et l'analyse préliminaire des risques où des évaluations et des mises à jour régulières des risques (à titre d'exemple, les études de dangers) qui ne tiennent pas compte de cette problématique d'incertitude (Buyong *et al.*, 2019 ; Sorichetti *et al.*, 2022). Dans la même perspective, les analyses par AdD, les

probabilités de défaillance sous-jacentes des événements sont généralement considérées comme des valeurs exactes (Sadiq *et al.*, 2008 ; Ferdous *et al.*, 2009).

Pour y remédier, il est important de travailler avec des estimations approximatives des probabilités (Khakzad *et al.*, 2013). Cela étant, différentes approches ont été proposées dans la littérature permettant la prise en compte des incertitudes en se basant sur l'estimation imprécise de la probabilité de défaillance dans diverses applications du monde réel. A cette fin, la théorie des ensembles flous a été proposée comme une alternative pour l'estimation de probabilité dans laquelle les informations disponibles sont incertaines, incomplètes et imprécises (Zadeh, 1965 ; Onisawa, 1990). De plus, ces dernières années, certains chercheurs se sont concentrés sur le développement de modèles qui intègrent la théorie des ensembles flous et l'élicitation d'experts ou l'opinion d'experts pour l'estimation des probabilités de défaillance. En effet, les approches basées sur la théorie des ensembles flous disposent d'outils puissants pour traiter les jugements subjectifs des experts (Kumar *et al.*, 2012). Par conséquent, plusieurs chercheurs ont utilisé avec succès la méthode d'analyse par arbre de défaillance flou (AdDF) dans divers domaines (Omidvari *et al.*, 2014 ; Lavasani *et al.*, 2015). Cela reste valable pour différentes approches telles que les méthodes LOPA, AdE, nœud papillon, etc. (Pouyakian *et al.*, 2021 ; Wu *et al.*, 2021).

Les travaux de recherche présentés dans ce manuscrit s'inscrivent dans cette problématique d'évaluation de la probabilité de défaillance floue des barrières de sécurité en présence d'incertitudes. Les approches proposées se fondent sur un usage intégré des ensembles flous de type 1 et 2, la méthode AHP et de différentes techniques d'agrégation d'opinions d'experts.

2. Objectifs de l'étude

En relation avec la problématique de ce travail doctoral, les travaux de recherche développés ont plusieurs objectifs cités ci-après.

- La considération des incertitudes attachée aux avis d'experts dans l'évaluation des probabilités de défaillance des barrières de sécurité. Ces barrières sont généralement identifiées lors d'une analyse qualitative des risques (HAZOP, par exemple) et représenter schématiquement à l'aide d'un AdE. Rappelons que le recours aux avis d'expert est imputable au manque de donnée de fiabilité. Cette considération est basée sur la théorie des ensembles flous, d'une part, et des techniques d'agrégation, d'autre part. l'approche utilisée inclut les ensembles flous type 1 et 2 et la méthode multicritère AHP (Analytic Hierarchy Process). Par ailleurs, les probabilités déterminées sont utilisées pour calculer les fréquences des scénarios d'accidents possibles selon le formalisme AdE.
- La prise en compte des incertitudes dans l'usage des AdD pour l'évaluation des probabilités de défaillances des barrières de sécurité d'urgence. Le choix de cette méthode est justifié par son pouvoir de modélisation confirmé. Plus précisément, l'objectif est d'estimer les différentes probabilités attachées aux événements de base de l'AdD à partir des jugements d'experts. A ce titre, la technique utilisée est

l'opérateur de la moyenne pondérée ordonnée incertaine dépendante améliorée (*DUOWA*).

- Le dernier objectif concerne l'amélioration de la fiabilité (ou disponibilité) des barrières de sécurité d'urgence jugées critiques (possédant des probabilités de défaillances les plus élevées). La démarche proposée à cette fin nécessite (i) la hiérarchisation des impacts de perturbation des barrières de sécurité sur le personnel, (ii) identification des événements de base critiques via le calcul de certains facteurs d'importance et (iii) la détermination des actions correctives les plus efficaces pour améliorer la fiabilité de la barrière de sécurité considérée. Précisons que cette détermination est fondée sur l'analyse subjective de sécurité à l'aide de la théorie du raisonnement probant.

3. Structure de la thèse

En plus de l'introduction générale, le présent manuscrit de thèse comporte cinq chapitres, dont trois chapitres théoriques et deux chapitres d'ordre pratique, et une conclusion générale. Une description succincte des différents chapitres est donnée dans ce qui suit.

- Le premier chapitre présente d'abord quelques définitions, concepts et méthodes liés au domaine de la gestion des risques et la maitrise des accidents industriels. Ensuite, une analyse statistique des accidents industriels dans le monde et en Algérie est abordée. Finalement, les barrières de sécurité (couches de protection) sont décrites en termes de modèles, de classification et critères de performance.
- Le deuxième chapitre est consacré à l'évaluation de la probabilité de défaillance floue des barrières de sécurité d'urgence et des fréquences d'accidents en présence d'incertitudes. Pour ce faire, les ensembles flous de type 1, 2 et intuitionniste sont présentés brièvement. De différentes techniques d'agrégation des avis d'experts sont ensuite présentées. Puis, la démarche proposée pour l'évaluation de la probabilité de défaillance floue des barrières de sécurité d'urgence est décrite. Elle se base l'estimation des poids de chaque expert via la méthode AHP floue type 2 et une procédure d'agrégation spécifique et le calcul des probabilités de défaillance à l'aide de la formule d'Onisawa. Enfin, le calcul de la fréquence d'occurrence des conséquences des situations d'urgence sur la base de l'analyse par « arbre des événements d'urgence ».
- Le troisième chapitre propose une démarche d'amélioration de la fiabilité des barrières de sécurité d'urgence. Cette démarche comporte plusieurs étapes à savoir : hiérarchisation des impacts des perturbations des barrières de sécurité à l'aide des méthodes AMPEC et AHP floue, usage de la méthode AdD combiné avec des techniques de jugements d'experts pour estimer les probabilités des événements de base et la probabilité de défaillance des barrières de sécurité, analyse d'importance des événements de base et la priorisation des actions correctives proposées en fonction de leur efficacité.
- Le quatrième chapitre vise l'illustration des différentes propositions méthodologiques décrites aux niveaux des chapitres 2 et 3, afin de démontrer leur pertinence et validité. Cette illustration concerne une sphère de stockage GPL située

une au niveau de la zone de stockage de GPL, complexe ZCINA (Hassi Messaoud), et le système d'extinction automatique d'incendie associé.

- Le cinquième et dernier chapitre est consacré à la présentation et la discussion de différents résultats concernant le cas d'étude mentionné ci-avant.

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

Pour plus de clarté concernant la structure du manuscrit, un résumé de la démarche proposée est présenté à la figure *i*.

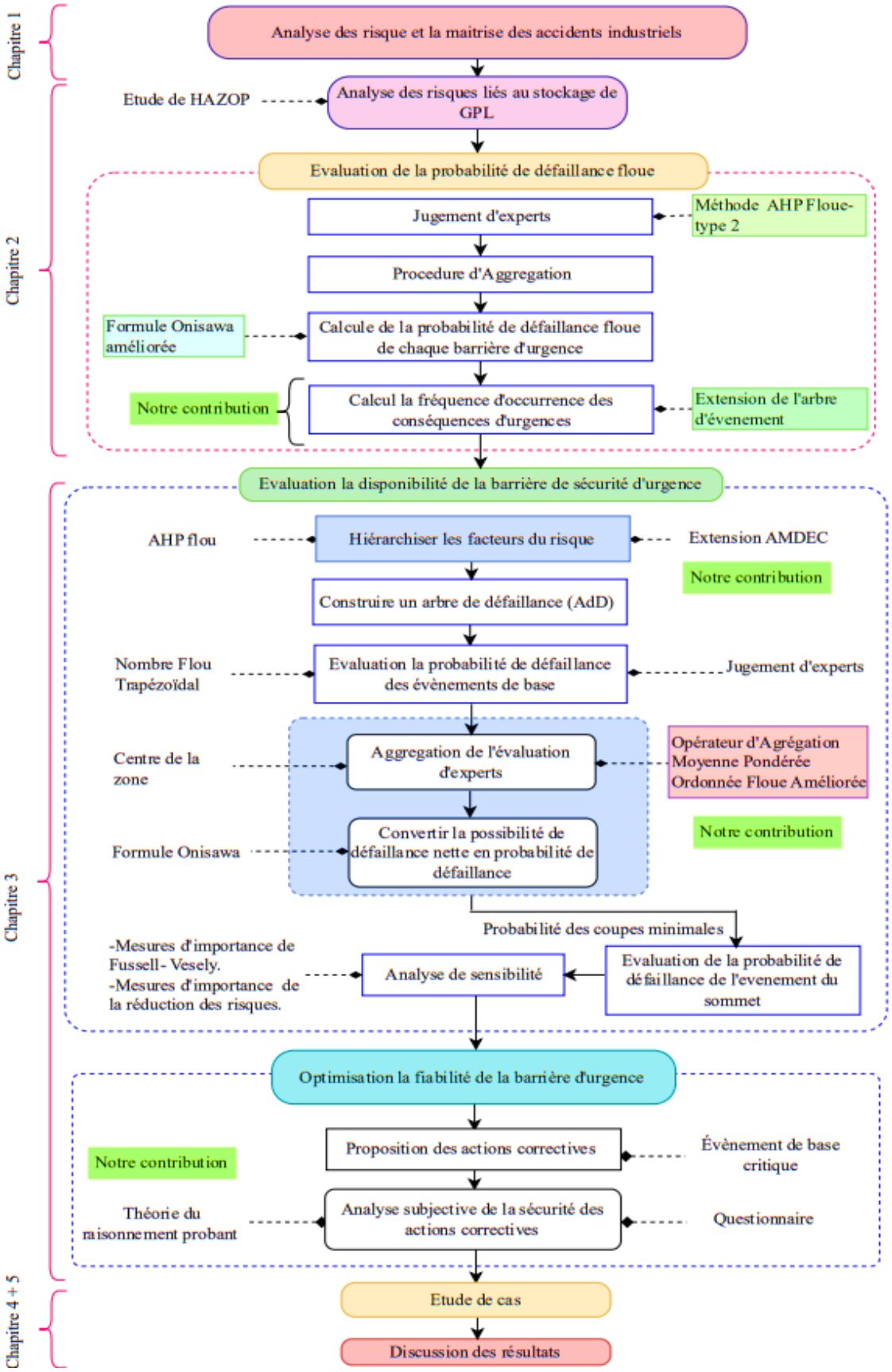


FIGURE i- La démarche de recherche proposée.

Chapitre 1

Gestion des risques et maitrise des accidents industriels

1.1. Introduction

La gestion des risques industriels et la maîtrise des accidents industriels sont particulièrement importantes pour le développement durable des installations industrielles. Les accidents industriels sont causés par la défaillance des barrières de sécurité associées. En installant des barrières de sécurité efficaces, ces accidents industriels peuvent être donc fortement réduits. A cette fin, l'objectif principal de la maîtrise des accidents industriels est de réduire les différentes pertes, en réduisant la vulnérabilité de notre environnement et de notre structure socio-économique.

Dans ce chapitre, nous présenterons d'abord quelques termes et définitions liés aux risques et aux accidents industriels majeurs. Une définition du mot risque et des mesures de risque et de vulnérabilité sont nécessaires. Ensuite, nous aborderons les détails liés à la démarche de la gestion des risques industriels selon la norme ISO 31000 (ISO/IEC 31000, 2018). Par conséquent, il est indispensable de présenter les méthodes d'analyse des risques dédiées à la maîtrise des accidents industriels selon la norme ISO 31010 (ISO/IEC 31010, 2019). Parmi ces méthodes, nous allons présenter la méthode HAZOP (HAZard and OPerability studies) (ISO/IEC 61882, 2016) et la méthode Arbre des événements (AdE). Puis, nous procéderons à l'analyse statistique des accidents industriels dans le monde et en Algérie. Enfin, nous aborderons les principaux concepts liés aux couches de protection contre les accidents industriels tels que le modèle de défense en profondeur, le modèle du nœud papillon, etc. Dans ce même contexte, nous décrierons brièvement la classification des barrières de sécurité et les critères d'évaluation de leurs performances.

1.2. Risques et accidents industriels

A l'origine de tout accident industriel, il existe un danger potentiel susceptible de provoquer un état plus ou moins préjudiciable à l'environnement humain. Cette section abord quelques notions de base dans le domaine de gestion des risques et la maitrise des accidents industriels.

1.2.1. Concepts et définitions

Il existe un très large éventail de termes et de définitions liés à la gestion des risques qui ont été proposés dans plusieurs travaux de recherches. Dans cette section, nous présentons quelques concepts essentiels le risque, la mesure du risque et la notion de la vulnérabilité.

1.2.1.1. Risque

Le terme risque est défini de différentes manières selon plusieurs documents scientifiques et les définitions les plus spécifiques sont les suivantes.

- Selon la directive européenne Seveso III (Annexe A**)** (2012/18/UE), le risque, est *"un événement accidentel se produisant sur un site industriel et entrainant des conséquences graves pour le personnel, la population, les biens et pour l'environnement".*
- Une autre définition du risque a été proposée par la norme ISO 45001 (ISO/IEC 45001, 2018) : "*la multiplication de la probabilité d'occurrence d'un événement ou d'une exposition dangereuse liée au travail et de la gravité des traumatismes et pathologies pouvant être causés par les événements ou les expositions*" (Grembo, 2010).
- La définition réglementaire du risque a été proposée par le texte réglementaire Algérien du décret exécutif n° 06-198 : "*un élément caractérisant la survenance d'un dommage potentiel associé à une situation de menace. Il est généralement défini par deux éléments : la probabilité de survenance d'un dommage et la gravité des conséquences*" (JORA n° 37, 2006).

1.2.1.2. Mesure du risque

La quantification du risque est une étape essentielle dans le domaine du risque industriel. Il peut juger de l'adéquation ou non des mesures préventives visant à prévenir les accidents industriels, ainsi que des mesures d'atténuation/ protection qui visent à limiter les effets en cas d'accident. Mais, pour décider de l'acceptabilité du risque, il faut pouvoir le mesurer et le comparer à la valeur seuil qui constitue l'objectif de sécurité.

Quantitativement et selon la norme ISO 73, (ISO/IEC 73, 2002), le risque est défini comme la *"combinaison de la probabilité d'un évènement redouté résultant d'une situation de danger et la gravité des dommages"*. Donc, cette définition peut être illustrée par l'équation mathématique suivante :

$$R = Pr \times G \tag{1.1}$$

Où : R est la mesure du risque (ou la criticité), Pr représente la probabilité de l'évènement indésirable (redouté ou dangereux) et G symbolise la gravité des dommages.

La figure 1.1, représente la matrice de la criticité d risque qui permet d'évaluer le risque. Au contraire, dans le diagramme de Farmer, la matrice de criticité n'a pas de frontière linéaire, mais donne un ensemble de couple des valeurs probabilité/ gravité (Pr/G). Pour limiter les erreurs de décision relative aux événements ayant un couple (Pr/G) proche du seuil d'acceptabilité, une notion de risque appelée "ALARP" (As Low As Raisonnablement Praticable : *aussi bas que raisonnablement possible*) est fréquemment appliqué.

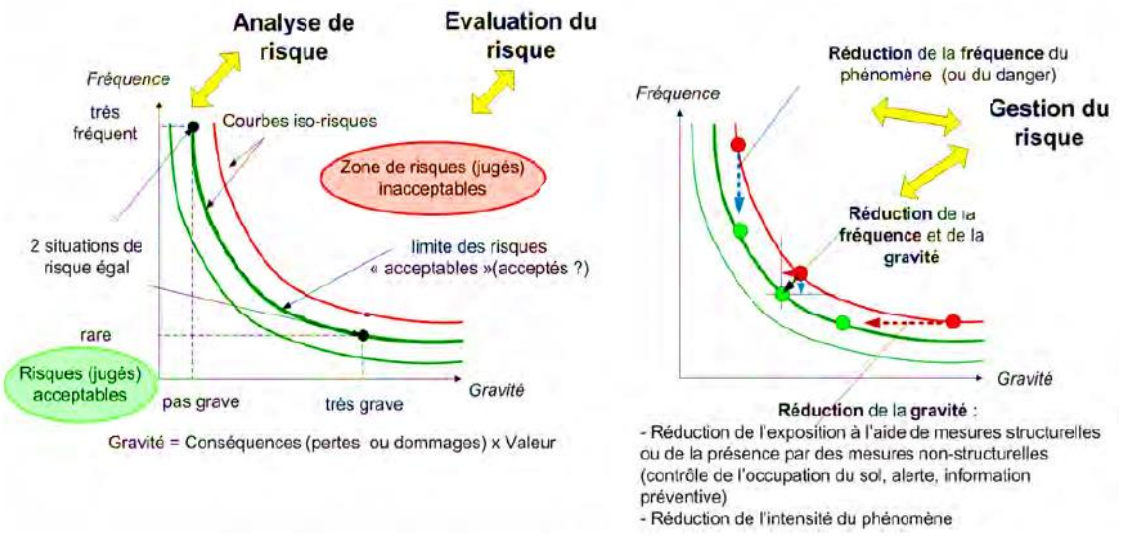


FIGURE 1.1 – Diagramme Fréquence- Gravité (Lievens, 1976).

La figure 1.2 illustre un exemple d'une matrice de criticité du risque en fonction de deux paramètres (probabilité et la gravité) qui comporte trois zones de risque : risque acceptable, risque ALARP (aussi bas que raisonnablement possible : toutes les barrières de préventions et de protections ont été mises en œuvre dans cette zone avec un coût économique raisonnable) et risque inacceptable.

La perception de l'acceptabilité du risque peut paraitre incertaine, surtout lorsque la vie des individus est en danger. En effet, la distinction entre les différents niveaux de risque n'est pas facile et dépend de la définition donnée de la probabilité et des différents niveaux de gravité qui composent la matrice de criticité du risque.

Mengual (Mengual, 2010) dans ses travaux, définit le risque en regroupant ces deux paramètres ; le phénomène dangereux (PhD) qui est à la source du risque et les cibles (enjeux) sensibles à ce phénomène. Le risque est ainsi présenté comme un produit du danger et de la vulnérabilité (Bulinge, 2002). Dauphiné (Dauphiné, 2001), propose sa définition du risque basée sur l'équation (1.2) suivante :

$$R = A \times V \tag{1.2}$$

Où, R représente le risque, A désigne l'aléa et V est la vulnérabilité.

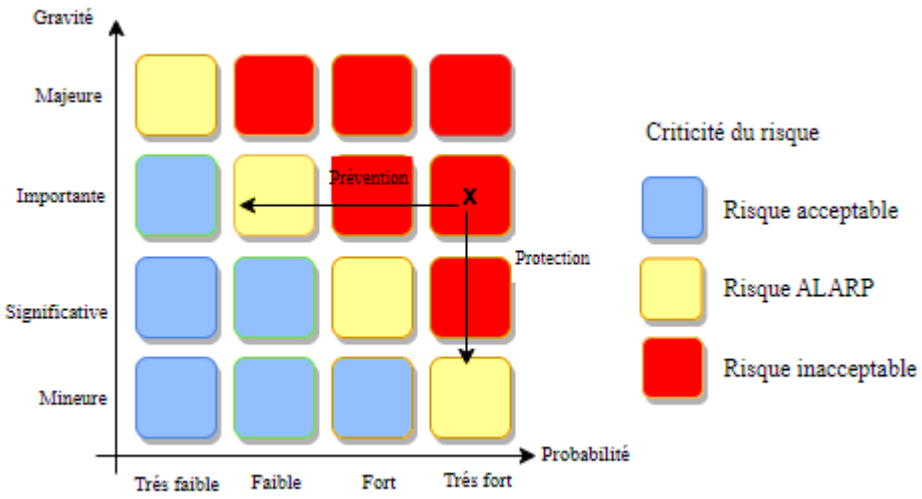


FIGURE 1.2 – Matrice d'évaluation du risque en fonction de la probabilité et de la gravité.

Le concept « d'aléa » est bien plus complexe qu'il n'y paraît à première vue, car il dépend de plusieurs paramètres à savoir : l'intensité du l'évènement dangereux, sa probabilité, sa durée et l'espace considérés (Dauphiné, 2001). Ces éléments vont déterminer « les éléments exposés et conséquences de l'aléa » (Beck, 2009). Par conséquent, Mengual explique que deux critères sont utilisés pour évaluer un aléa (Margossian, 2006) : le phénomène dangereux (nature, intensité, localisation, etc.) et sa probabilité selon l'équation (1.3).

$$A = I \times Pr \tag{1.3}$$

Où, A représente l'aléa, Pr est la probabilité d'occurrence et I est l'intensité.

La figure 1.3, montre tous les critères nécessaires à la réduction des risques industriels. Bien entendu, il existe de nombreux niveaux d'aléas et de vulnérabilités (très faible, faible, fort et très fort) et donc de nombreuses combinaisons possibles, ce qui multiplie le nombre de possibilités et donc la tentation de l'auteur Bonnet, (2002) de considérer l'équation (1.4) suivante :

$$R = f(A, V) \tag{1.4}$$

Où, R est le risque, A est l'aléa et V la vulnérabilité.

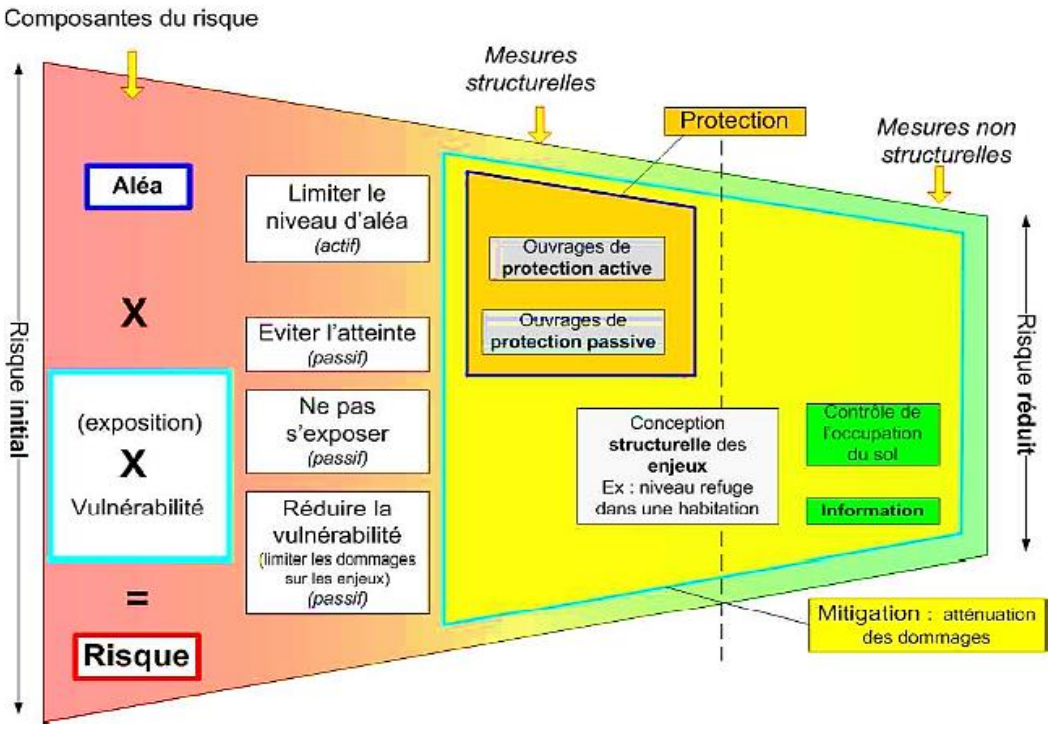


FIGURE 1.3 – Les paramètres essentiels de la réduction des risques industriels.

Deux approches ont été développées pour évaluer les aléas, on parle alors de l'approche probabiliste et de l'approche déterministe. La première approche est basée sur l'évaluation et l'estimation quantitative des résultats et la vraisemblance des scénarios d'accident possibles, tandis que la seconde approche est basé sur l'évaluation des résultats (Zimmermann *et al.,* 2007).

Les méthodes probabilistes évaluent le risque quantitativement et déterminent la probabilité qu'un événement se produise (Glatron *et al.,* 2008). Cela passe par trois étapes :

- Identifier les risques inhérents aux activités industrielles.
- Quantifier ces risques par des estimations quantitatives de probabilités et de conséquences d'accidents.
- Évaluer l'acceptabilité des risques avec la définition des critères de références. Deux résultats émergent : le risque individuel[1] et le risque sociétal[2] (figure 1.4).

[1] Le risque individuel, représente une répartition du risque liée à un site industriel qui illustre la *"fréquence annuelle à laquelle un individu présent en un lieu sans protection, peut subir certains dommages pendant une courte période après l'accident "* (Zimmermann, 2005).

[2] Le risque sociétal *"illustre la probabilité qu'un certain nombre de personnes puisse mourir suite à un accident industriel "* (Zimmermann, 2005).

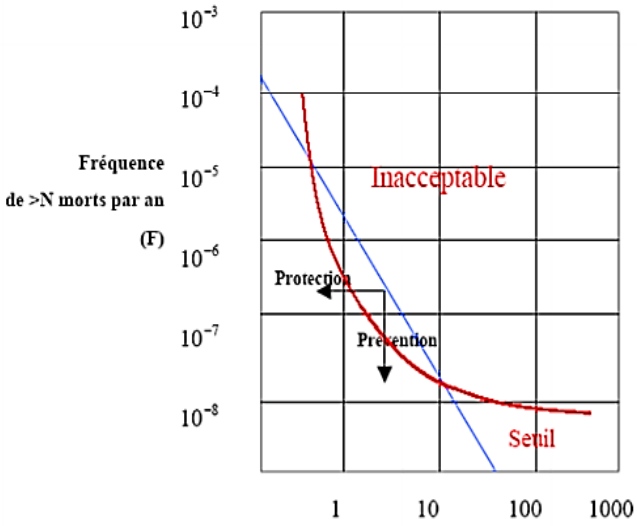


FIGURE 1.4 – La réduction du risque sociétal (De Dianous *et al.*, 2007).

1.2.1.3. Vulnérabilité

Le deuxième paramètre qui compose le risque avec le paramètre l'aléa, c'est la « *vulnérabilité* ». La question de la vulnérabilité prend une place importante et croissante dans la recherche scientifique depuis plusieurs années (Gilbert, 2002 ; Griot, 2007). La vulnérabilité fait référence à la sensibilité d'un cible à un danger (Veyret, 2003). La vulnérabilité représente également une valeur en termes de problèmes humains, physiques et environnementaux (Daas *et al.*, 2014, a ; Rodriguez *et al.*, 2023). A partir de là, il est nécessaire de déterminer, d'évaluer les cibles exposés et les dommages qu'ils peuvent subir et donc *« définir les dommages de l'aléa sur les cibles »* (Maillard, 2002). La vulnérabilité peut donc être considérée comme la fragilité du système ou des composants d'une organisation dans la mesure où les risques auxquels il est confronté sont les éléments les plus dommageables pour une organisation lors d'une catastrophe industrielle.

Selon Griot (Griot, 2007), la vulnérabilité d'une zone à risque peut se définir comme *"la combinaison de l'évaluation (quantitative et qualitative) des cibles, leur sensibilité et leur degré d'exposition à l'aléa"* comme montré dans l'équation (1.5) suivante :

$$V = f(C, NS, DE) \tag{1.5}$$

Où, V représente la vulnérabilité, C indique les cibles, NS est le niveau de sensibilité et DE est le degré d'exposition.

Wybo (Wybo, 2012), dans ses travaux, il propose de représenter la vulnérabilité au sens le plus général de la sensibilité d'une organisation à entrer en crise et s'appuie sur le modèle du «flux de danger », qui a été développé dans le cadre de la méthodologie d'analyse des dysfonctionnements des systèmes (MADS). Ce modèle comprend des stratégies de prévention des accidents industriels en introduisant des barrières de sécurité pour le rendre plus efficace comme montre la figure 1.5 (Perilhon, 2003) et considère trois facteurs :

- Les caractéristiques internes des enjeux vulnérables.
- La distance séparant la cible de la source de danger et détermine le degré d'exposition à celle-ci.
- La capacité de l'organisation à surmonter les situations d'urgences prévues ou non dans les plans et à en garder le contrôle sans basculer en cas de crise.

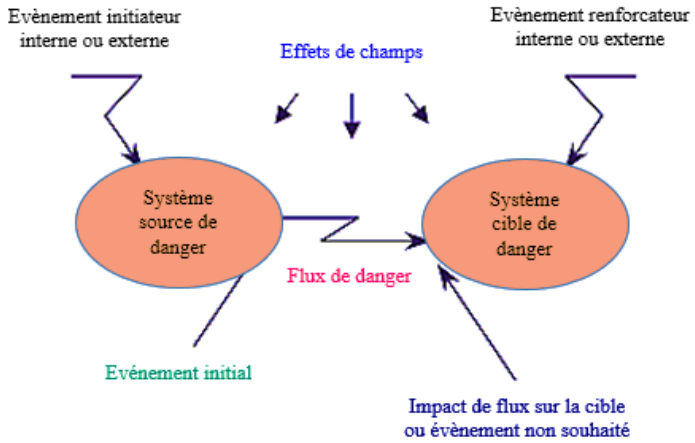


FIGURE 1.5 – Model d'accident « flux de danger ».

La gestion des situations d'urgence et la maitrise des accidents industriels sont mises en œuvre par un ensemble d'acteurs au niveau organisationnel qui doivent être liés au processus d'évaluation de la vulnérabilité, facilitant l'allocation de leurs forces et faiblesses organisationnelles (Wybo, 2012).

1.2.2. Démarche de gestion des risques

La gestion des risques est l'une des préoccupations majeures de la prévention et de la maîtrise des accidents industriels au sein des installations industrielles. Selon la norme ISO 31000, (ISO/IEC 31000, 2018) relative à la gestion des risques, le concept de "la gestion des risques" est définie comme "*un ensemble d'activités coordonnées visant à diriger et contrôler une organisation*". Cette définition inclut la coordination pour conditionner le traitement des risques au sein de l'organisation et en tirer les meilleures solutions pour les parties prenantes.

La norme ISO 31000 définit le processus de management des risques comme illustré dans la figure 1.6, ci-après.

Le processus de management des risques nécessite une communication avec des parties prenantes internes et externes prédéfinies dans le cadre de l'organisation. D'autre part, la nécessité d'un examen de suivi et revue comprend la planification, la collecte et l'analyse des informations, ainsi que l'enregistrement et la réponse aux résultats. Les résultats de contrôle et de l'examen doivent être intégrés aux activités de gestion de la performance, de

suivi des résultats et de compte rendu de l'organisation. L'enregistrement et l'élaboration de rapports de suivi ont pour principaux objectifs de fournir des informations en vue de la prise de décisions et d'améliorer les activités de management du risque. Par conséquent, l'appréciation des risques consiste à identifier, analyser et évaluer les risques qui permettant de causer des dommages plus ou moins graves aux cibles exposées.

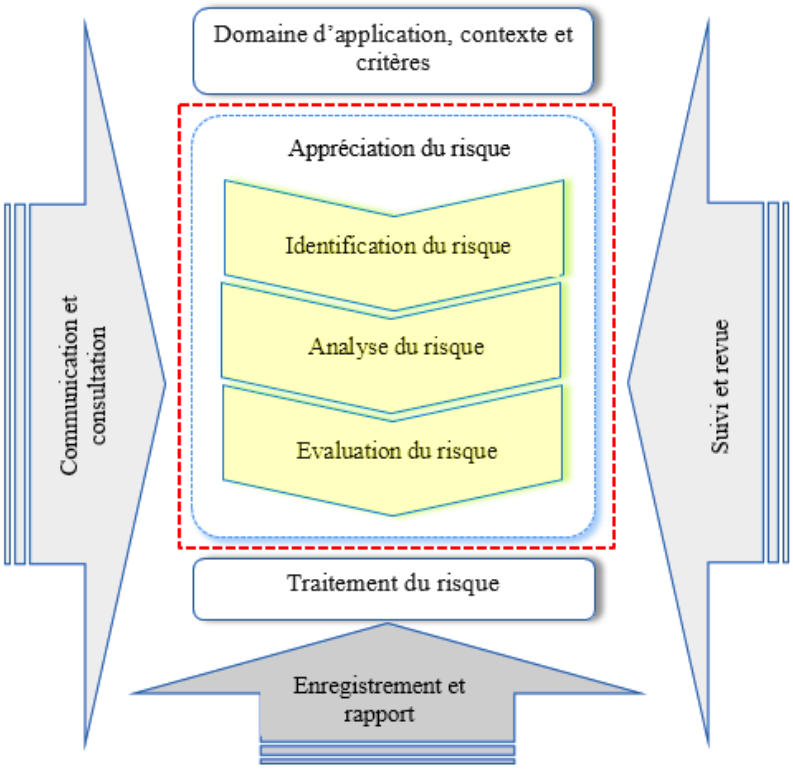


FIGURE 1.6 – Processus de gestion des risques industriels (ISO 31000, 2018).

1.2.2.1. Identification du risque

Il s'agit de préparer une liste des risques susceptibles d'interférer favorablement ou inversement avec l'atteinte des objectifs. Il est essentiel que les informations utilisées soient pertinentes, appropriées et à jour. La concertation et l'utilisation d'outils de type brainstorming ou autres sont des moyens efficaces d'identifier les sources du risque.

1.2.2.2. Analyse du risque

L'objectif de l'analyse des risques est de comprendre la nature du risque et ses caractéristiques, y compris la criticité de risque (risque acceptable, faible ou inacceptable) comme illustré dans la Figure 1.2. L'analyse des risques industriels implique une évaluation détaillée des incertitudes et la subjectivités, de dommage des accidents, de la probabilité,

des événements, des scénarios d'accidents, des moyens de contrôle existants. Un événement peut avoir de nombreuses causes et conséquences et peut affecter de nombreux objectifs.

L'analyse des risques fournit des données pour estimer le risque, décider de le traiter ou non et sélectionner les stratégies de la prévention et les méthodes de traitement les plus efficaces.

1.2.2.3. Evaluation du risque

Elle consiste à comparer les résultats de l'analyse des risques aux critères de risque établis dans l'évaluation des risques pour identifier si d'autres mesures préventives sont nécessaires. Cela peut conduire à une décision :

- Ne rien faire de plus.
- Examiner les options de traitement des risques.
- Effectuez une analyse plus approfondie pour mieux comprendre les risques.
- Maintenir les moyens existants de contrôle des risques.
- Réexaminer les objectifs.

Le but de traitement du risque est de déterminer et de mettre en place des solutions pour faire face aux risques. Le traitement des risques industriels implique un processus itératif :

- Créer et sélectionner des solutions de traitement des risques industriels.
- Élaboration et mise en place des actions sélectionnées de traitement des risques industriels.
- Évaluer l'efficacité de ces solutions.
- Déterminer si le risque résiduel est acceptable.
- Si le risque n'est pas acceptable, envisager et chercher d'autres options de traitement.

Le traitement du risque consiste par exemple à l'élimination de la source du risque, l'arrêt de l'activité porteuse du risque, la modification de sa probabilité, etc. Les options de traitement du risque sont choisies en tenant compte des composantes économiques, sociales, réglementaires et contractuelles de l'organisation. Ces choix sont documentés dans un plan de traitement des risques qui comprend, entre autres, les raisons des choix, la personne responsable de la mise en œuvre, les outils nécessaires à la mise en œuvre, les mesures de performance et la date de mise en œuvre.

1.2.3. Méthodes d'appréciation des risques

La norme ISO 31010 (ISO/ICE 31010, 2019) propose des méthodes et des outils qui peuvent être utilisées au cours de l'appréciation des risques industriels (voir figure 1.6). Rappelons que l'appréciation des risques vise à identifier, analyser et évaluer les risques (ISO/ICE 31000, 2018). Les techniques d'appréciation des risques sont utilisées pour évaluer les

risques et de prendre les décisions relatives au traitement des risques. Les méthodes de l'estimation des risques a pour but :

- Identifier le risque industriel telles que les méthodes AMDEC, Swift (Heijungs *et al.*, 2007 ; Song *et al.*, 2014) et HAZOP (Mocellin *et al.*, 2022 ; Nguyen *et al.*, 2022).
- Déterminer les sources et les facteurs de risque, ainsi que le niveau d'exposition à ce risque industriel.
- Examiner l'efficacité globale des barrières de maîtrise, et l'effet modifiable des traitements de risque suggérés (comme la méthode LOPA (Wang *et al.*, 2023), arbre des défaillances (AdD).
- Comprendre les conséquences et la vraisemblance (comme la méthode analyse d'arbre des évènements (AdE), réseau bayésien (Ding *et al.*, 2020) et simulation Monte Carlo).
- Analyser les interactions et les dépendances.
- Fournir une mesure du risque.

Dans notre travail de recherche, l'identification des risques est réalisée en utilisant la méthode HAZOP qui est une méthode adéquate et répond à notre premier besoin, c'est-à dire, l'identification des scénarios et surtout les évènements initiateurs qui mènent à la survenance d'accidents. Par la suite et afin de comprendre les conséquences et la vraisemblance des scénarios d'accidents, nous mettrons à profit la méthode AdE (IEC 62502, 2010) et la méthode arbre des défaillances.

1.2.3.1. Méthode HAZOP

L'analyse et l'évalution des risques par la méthode HAZOP est une méthode normalisée par la norme IEC 61882 (IEC 61882, 2016). Généralement, elle est souvent utilisée pour les procédés d'hydrocarbures (Rossing *et al.*, 2010). Cependant, de différentes extensions ont été établies : optHAZOP (optimal HAZOP), introduite par Khan *et al.*, (1997), (2005), SCHAZOP (safety culture HAZOP) développée par Kennedy *et al.*, (1996) et HHAZOP (Human HAZOP) introduite par Fattor *et al.*, (2019).

L'HAZOP est une démarche inductive, qualitative (ou semi-quantitative) et systématique, permettant de montrer comment un système neuf ou existant pourrait dévier par rapport à son fonctionnement normal (intention de conception) à fin de le sécuriser et optimiser son exploitation. A ce titre, en utilisant une approche inédite de mot-guide (voir tableau 1.1) alimentée par une équipe multidisciplinaire, l'HAZOP permet d'étudier d'une façon systématique les déviations probables des différents paramètres (température, débit, pression, niveau, …) des différents sous-ensembles, appelés "nœuds", d'un process en vue d'en identifier les causes probables, les conséquences et les moyens de maitrise adéquats.

La mise en œuvre de la démarche de la méthode HAZOP nécessite la disponibilité des informations détaillées du système étudié telles que les plans de circulation des fluides et les schémas P&ID (Piping and Instrumentation Diagram).

TABLEAU 1.1 - Principaux mots-guides.

Mot-guide	Signification
Ne pas faire	Négation totale de l'intention de conception.
Plus	Augmentation quantitative.
Moins	Diminution quantitative.
En plus de	Modification/ augmentation qualitative.
Partie de	Modification/ diminution qualitative.
Inverse	Contraire logique de l'intention de conception
Autre que	Remplacement total

Les résultats obtenus de l'étude HAZOP sont fournis dans un tableau dont la forme peut être différente selon l'objectif de l'étude. La norme (IEC 61882, 2016) donne le tableau suivant. D'autres formes de tableau peuvent inclure une estimation du risque via les paramètres gravité et probabilité (tableau 1.2).

TABLEAU 1.2 - Feuille HAZOP.

Titre de l'étude							Page :		
Dessin n ° :		Révision n° :					Date :		
L'équipe HAZOP :							Date de la réunion :		
Partie considérée :									
No.	Mot-guide	Elément	Déviation	Causes possible	Conséquences	Mesures de protection	Commentaires	Actions requises	Actions affectées à

1.2.3.2. Analyse par arbre des événements (AdE)

L'arbre d'événements (AdE) (IEC 62502, 2010) est une technique graphique qui représente les séquences mutuellement exclusives des événements qui pourraient survenir à la suite d'un événement initiateur, selon le fonctionnement ou non des différentes barrières de sécurité ou moyens de maitrise (et certains événements), pour en faire varier les conséquences (ISO/IEC 31010, 2019) (IEC 62502, 2010). Les événements initiateurs peuvent être une défaillance d'un système ou d'un sous-système, une action humaine non

prescrite (erreur, utilisation abusive, agression, sabotage...), agression de l'environnement (foudre, champ électromagnétique, choc, gel, tremblement de terre, etc.), effets dominos (incendie, explosions, ...) ou un événement fonctionnel (opération de remplissage, de maintenance,…).

L'arbre commence par l'événement initiateur, puis des lignes sont tracées pour représenter la réussite ou la défaillance de chaque moyen de maîtrise. La probabilité de défaillance ou de réussite peut être assignée à chaque moyen de maîtrise (branche), à partir du jugement de l'expert, des données ou d'analyses par arbre des défaillances (Hong *et al.*, 2009) (ISO/IEC 31010, 2019).

La fréquence des différentes conséquences est déterminée par le produit des probabilités individuelles et de la fréquence de l'événement initiateur, selon l'expression mathématique donnée par l'équation (1.6) :

$$f(S_i) = f(EI) \times P(e_1) \times p(e_2/e_1) \times p(e_3/e_1 \cap e_2) \times \ldots \times P(e_m/e_1 \cap e_2 \cap \ldots \cap e_{m-1}) \quad (1.6)$$

Où, $f(S_i)$ est la fréquence d'occurrence d'une séquence s_i, $f(EI)$ est la fréquence m est le nombre d'évènements (défaillance ou fonctionnement d'une barrières de sécurité, par exemple) dans la séquence et $P(e_1)$, .., $P(e_m)$ représente les probabilités ces événements.

Si l'on considère que les évènements sont mutuellement indépendants, on peut réécrire l'équation (1.6) sous la forme réduite suivante :

$$f(S_i) = f(EI) \times \prod_{j=1}^{m} P(e_j) \quad (1.7)$$

La figure 1.7, représente un exemple d'un arbre des évènements.

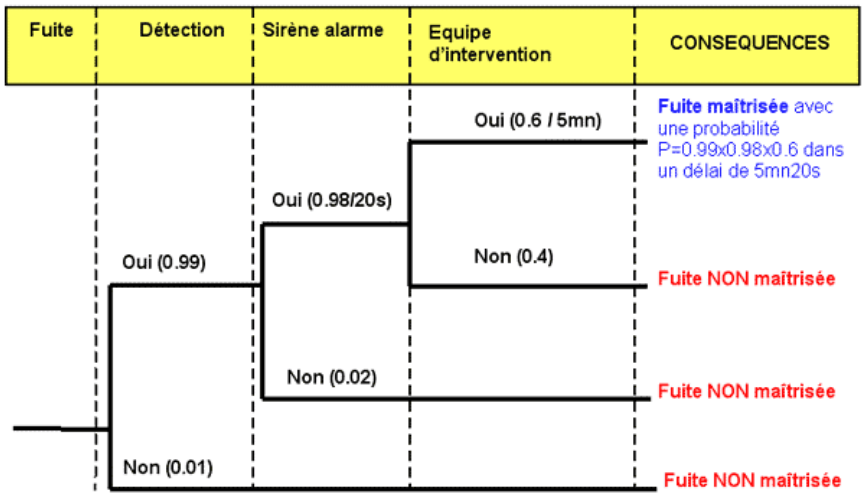


FIGURE 1.7 – Exemple illustratif d'un arbre d'événement.

1.3. Maitrise des accidents industriels

1.3.1. Définition de l'accident industriel majeur

Margossian définit un accident dans son livre, (Margossian, 2006), comme « *un événement déclencheur imprévu qui entraîne des blessures et des dommages matériels* et *environnementales*». Les dommages causés par l'accident peuvent être plus ou moins importants, temporaires ou permanents. Selon (Lagadec *et al.*, 2002), un accident majeur est « *un événement non souhaité, tel qu'une émission atmosphérique, un incendie ou une explosion importante, lié au développement incontrôlé d'une activité sur un site industriel, qui entraîne un danger grave, immédiat ou différé, pour une personne*". A cet effet, un accident est qualifié d'accident grave ou catastrophique si les conséquences en jeu sont importantes et s'il répond classiquement au moins à l'un des trois critères suivants (Margossian, 2006) :

- L'accident a fait un grand nombre de victimes, blessés ou morts, et des dégâts importants tout autour.
- Les accidents nécessitant le déploiement d'importants équipements de secours et diverses interventions.
- Accidents entraînant une pollution environnementale permanente ou à long terme avec des dommages importants, souvent irréversibles.

D'autre part, les travaux de Dautun (Dautun, 2007) expliquent quand le système organisationnel est perturbé par un événement déclencheur et selon le niveau de gravité des conséquences on aboutit à un incident, un accident, une crise, une crise de grande ampleur et une crise conventionnelle. Chaque niveau correspond à une structure de gestion plus ou moins complexe qui est créée dans des plans d'intervention internes ou externes. La figure 1.8, permet de mieux situer ces niveaux de gravité les uns par rapport aux autres selon les trois types type des accidents savoir l'accident majeur, la crise conventionnelle et la crise de grande ampleur.

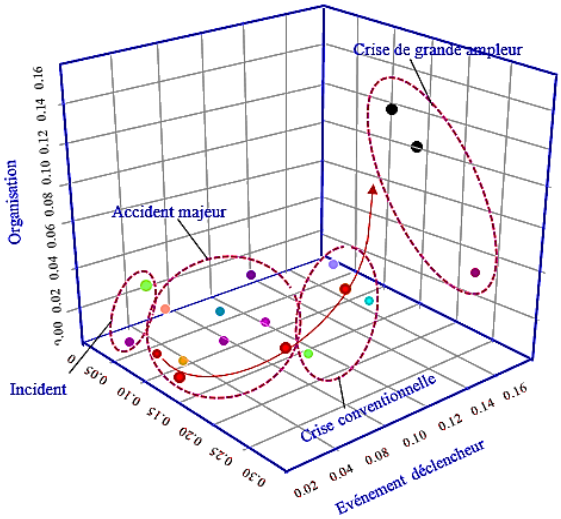


FIGURE 1.8 – Les niveaux de gravité des accidents (Dautun, 2007).

1.3.2. Analyse statistique sur les accidents industriels en Algérie

Dans ce qui suit, nous allons étudier les statistiques des accidents industriels dans le monde et en Algérie en particulier.

1.3.2.1. Statistique des accidents industriels à l'échelle mondiale

Globalement, l'importance de ces accidents majeurs est marquée notamment par plusieurs accidents répertoriés dans le tableau 1.3 qui représente les principaux accidents majeurs mondiaux de 2004 à 2021. On constate que la quasi-totalité des accidents industriels se situent au stade de la production, du transport, du stockage, de l'utilisation des substances dangereuses. Ses aléas s'inscrivent généralement dans un triple registre mêlant souvent explosion, incendie et pollution atmosphérique.

La figure 1.9 représente la répartition des catastrophes industrielles autour du monde par an.

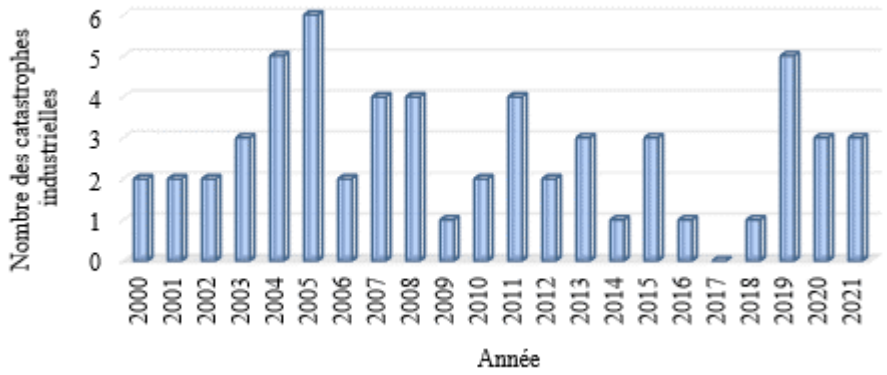


FIGURE 1.9 – Nombres des catastrophes industrielles dans le monde par an (Source : International Association of Oil et Gas Producers, 2021).

La figure 1.10, illustre la tendance des accidents industriels sur les 10 ans dans l'industrie pétrolière et gazière de la période entre 2012 à 2021 selon les statiques de l'IOGP (International Association of Oil et Gas Producers (IOGP), 2021). Le plus grand nombre de 45 accidents s'est produit en 2012, tandis que le plus petit nombre de 15 accidents s'est produit en 2020. De même, le plus grand nombre de décès est 95 qui se sont produit en 2012, tandis que le nombre minimum de 20 décès a été enregistré en 2020. Par contre, la baisse du nombre d'accidents et de décès ces deux dernières années est due à l'épidémie de coronavirus (Covid_19).

TABLEAU 1.3 – Recueil des accidents industriels survenus dans le monde entre 2004-2021 (Source : International Association of Oil et Gas Producers, 2021).

Année	Lieu	Nature	Conséquence
2004	-Algérie (Skikda).	-Explosion au niveau de bac de stockage de GNL.	-27 morts et 74 blessés parmi les travailleurs. Des dommages enregistrés dans un rayon de 4 km.
	-Belgique.	-Explosion d'un important gazoduc.	- 20 morts, 132 blessés et des dégâts matériels importants.
	-Japon.	-Explosion au niveau de la central nuclaire.	-5 morts, 7 blessés et des dégâts matériels importants.
2005	-Angleterre.	-Incendie dans un terminal pétrolier.	-43 blessés et des dégâts matériels.
	-Allemagne.	-Explosion dans une usine de biogaz.	-4 morts et des dégâts importants.
2006	-Algérie (HMD).	-Explosion dans un site pétrolier à Gassi Atouil.	-5 morts, des blessés et des dégâts matériels.
	-Indonesian.	-Explosion au niveau d'un puits de pétrole.	-Dégâts matériels importants.
2008	-Algérie.	-Explosions dans la zone pétrochimique d'Arzew.	-Blessés et des dégâts matériels importants.
	-Russie.	-Explosion dans une usine de poudre.	-4 morts, 5 blessés et des dégâts matériels importants.
2009	-France	-Explosion sur la plateforme pétrochimique.	-2 morts, 6 blessés et dégâts graves.
2010	-Hongrie	-Incendie dans l'usine d'aluminium.	-Blessures et dégâts matériels.
2011	-Japon	-Emission des matières radioactive de la centrale nucléaire Fukushima suite un séisme.	-Pollution et des dégâts matériels importants.
2012	-Brazzaville.	-Explosion d'un dépôt d'armes.	-282 morts, 2300 blessés et des dégâts importants.
	-Venezuela.	-Explosion à la raffinerie suite une fuite de gaz.	-48 morts et blessés.

TABLEAU 1.3 (suite)– Recueil des accidents industriels survenus dans le monde entre 2004-2021 (Source : International Association of Oil et Gas Producers, 2021).

Année	Lieu	Nature	Conséquence
2013	-Etat unis.	-Explosion causée par nitrate d'ammonium.	-14 morts et 200 blessés.
	-Canada.	-Déraillement d'un train transportant une quantité importante de pétrole brut.	-47 morts et des blessés.
	-Chine.	-Explosion d'un oléoduc dans le port.	-47 morts et des dégâts importants.
2014	-Turquie.	-Explosion dans une mine.	-300 morts et des blessés.
2015	-Chine.	-Explosion d'un entrepôt contenant de 2400 Tonnes des produits toxiques.	-173 morts et des dégâts considérables.
2016	-Mexique.	-Explosion.	-36 morts et 70 blessés.
2018	-France.	-Explosion dans un silo à grain.	-4 blessés et des dégâts considérables.
2019	-Chine.	-Explosion dans une usine de fabrication de pesticides.	-78 morts, 617 blessés et pollution importante au NOx dans l'atmosphère.
	-France.	-Important incendie se déclare dans l'usine Lubrizol.	-Pollution atmosphérique.
2020	-Liban.	-Explosion dans un entrepôt contenant 2750 tonnes de nitrate d'ammonium.	-5 morts, 5000 blessés et une partie importante de la ville est dévastée.
2021	-Allemagne.	-Explosion survenue dans une usine chimique.	-Blessures et pollution atmosphérique importante.

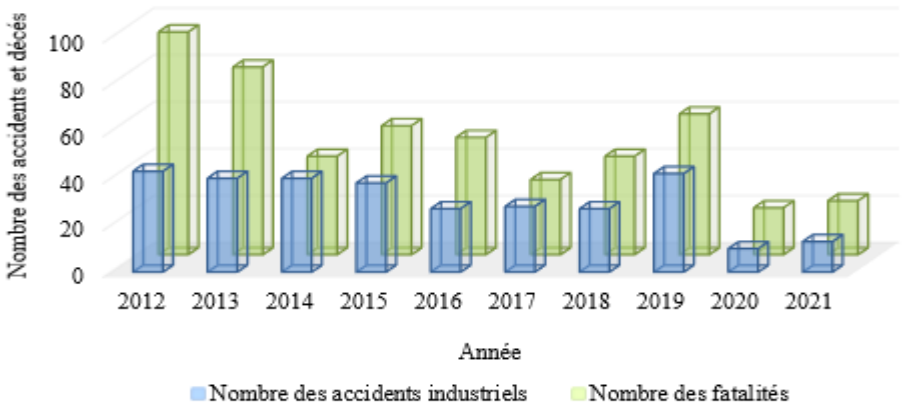


FIGURE 1.10 – Nombre des accidents et décès dans l'industrie pétrolière et gazière (Source : International Association of Oil et Gas Producers, 2021).

1.3.2.2. Statistiques des accidents industriels en Algérie

L'Algérie a connu de nombreux événements exceptionnels résultant des accidents industriels qui ont causé des pertes d'ordre humaines et matériel. Jusqu'à la catastrophe de Skikda de 2004, aucune grande catastrophe industrielle n'avait été observée (Chettouh *et al.*, 2016 ; Ait Ouffroukh *et al.*, 2018). En 2012, plus de 4000 installations industrielles à haut risque ont été recensées en Algérie. Ces installations industrielles sont situées en plein développement urbain et sur 1,7% de la superficie totale de l'Algérie, où vit la grande majorité de la population.

Sonatrach est l'une des grandes entreprises en Algérie dans le domaine des hydrocarbures. Ces dernières années, il y a eu plusieurs cas d'accidents industriels graves. Les accidents survenus sur tous les sites de la division de production de Sonatrach à Hassi Messaoud sont représentés dans la figure 1.11.

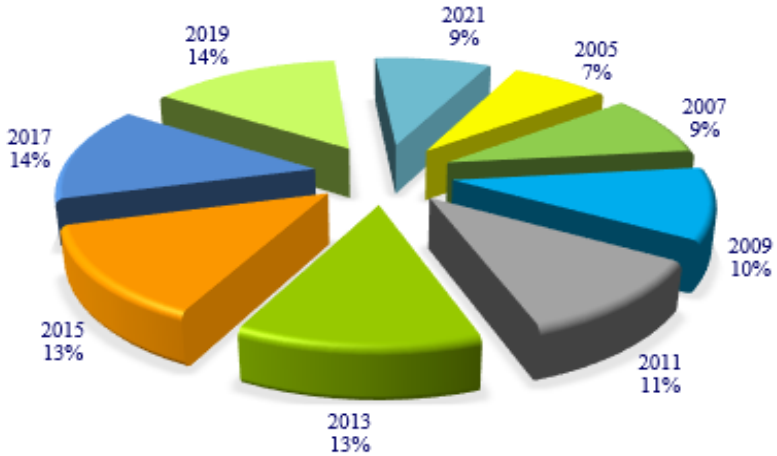


FIGURE 1.11 – Répartition des accidents industriels survenus au niveau de la division de production de Sonatrach à Hassi Messaoud.

Les accidents et incidents impliquant des substances dangereuses ont été répartis selon le type de substance, l'équipement concerné et l'origine de la cause. La figure 1.12, représente la distribution des accidents industriels selon le type de phénomène et est reprise ci-dessous par un intervalle du temps de 5 ans. Dans ce contexte, la période de 2007- 2011 est caractérisée par un taux très élevée de dégagement de fumé (62%) par rapport aux autres périodes. Par contre les phénomènes d'incendie et d'explosion ont un taux très élevé dans la période de 2017- 2021 par rapport aux autres périodes.

La figure 1.13 représente la répartition des accidents/incidents par causes initiales. Il s'avère que les accidents industriels ont principalement une cause liée à une erreur humaine, soit 24 %, ou à un problème d'équipements, 25 %. En termes de conséquences, seul 1% des accidents ont pour conséquences une ou plusieurs décès. Mais les pollutions de l'environnement et les dégâts matériels représentent 45% des accidents. Seulement 14% des incidents n'ont aucune conséquence, que ce soit en terme humain, environnemental ou financier.

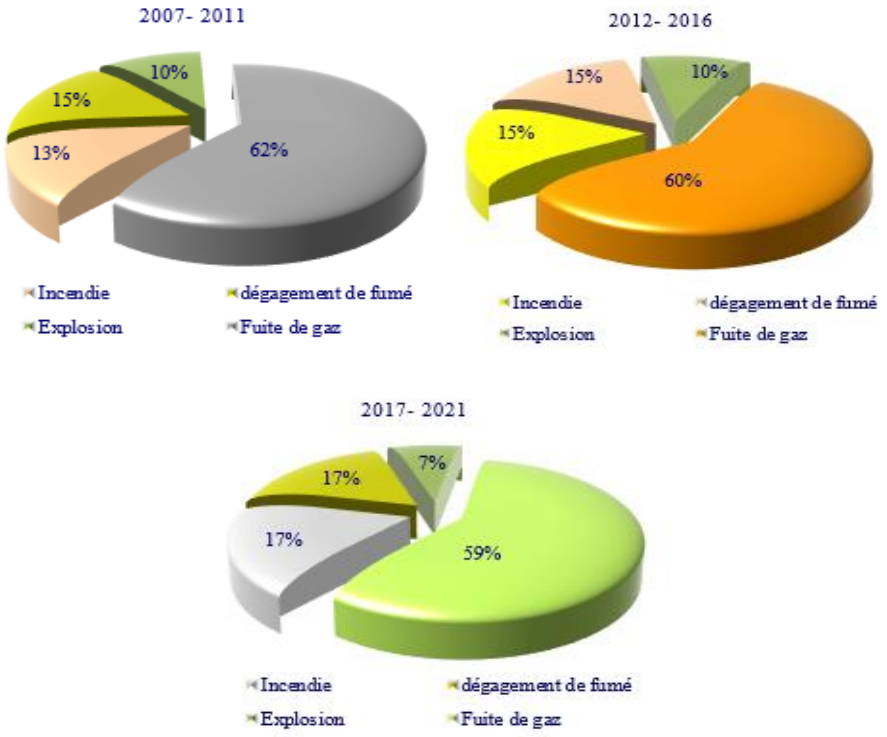
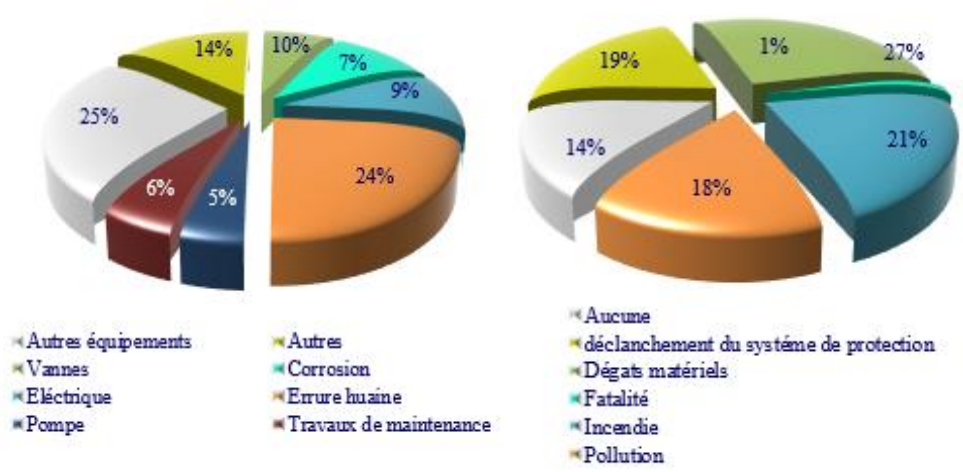


FIGURE 1.12 – Distribution des accidents industriels selon le type de phénomène.



(a). Répartition des accidents par causes. (b). Répartition des accidents par conséquence.

FIGURE 1.13 – Répartition des accidents industriels impliquant une substance dangereuse.

1.3.3. Dispositifs réglementaires de la gestion des accidents industriels en Algérie

En Algérie et après exactement la catastrophe industrielle de Skikda en 2004, les autorités algériennes ont renforcé l'aspect réglementaire via le décret exécutif n° 06-198 (JORA n° 37, 2006) pour les installations classées à hauts risques. L'objectif de ce texte réglementaire est de gérer les accidents majeurs, lors de la survenance d'un accident industriel entraine des dommages sur le personnel, la société, l'économe et/ou l'environnement (Daas, 2020). Un ensemble des mesures préventives est mise en œuvre pour assurer les meilleures conditions d'information, de réponse aux accidents et d'assurer des moyens de secours et d'intervention (Daas, 2020).

La réglementation algérienne impose donc dans la loi 04-20 la mise en place de plans de réponse aux catastrophes industrielles pour assurer la capacité de réponse aux accidents industriels majeurs causés par des risques technologiques (Daas, 2020). Ces plans visent à permettre aux autorités de se préparer en amont de ces événements et ainsi éviter d'aller vers la gestion de crise. Il définit également les rôles et responsabilités pour chaque niveau d'organisation de ces plans. Il existe trois plans de gestion en fonction de la gravité de l'accident et des capacités d'intervention (Daas, 2020) :

- Plan Interne d'Intervention (PII). Ce plan est institué par la loi n° 04-20 qui a pour but d'assurer la prévention des risques majeurs et à la gestion des accidents industriels (JORA n° 84, 2004) (Daas, 2020). Selon l'article 2 du décret exécutif n° 09-335 du 20 octobre 2009 **(**JORA n° 60, 2009), le PII est conçus comme un instrument réglementaire de gestion et de planification des urgences, visant à protéger les personnels, les biens et l'environnement, et définissant l'ensemble des mesures de prévention et de protection, les moyens d'intervention mobilisés ainsi

que les procédures à mettre en œuvre lors du déclenchement d'un accident industriel (Daas, 2020). Lors d'un accident qui risque de dépassé les limites de l'installation ou nécessitant des réactions d'urgence, le plan particulier d'intervention (PPI) se déclenche (Benahmed *et al.*, 2015 ; Daas, 2020).

— Plan Particulière d'Intervention (PPI). Ce plan est exigé par le décret exécutif n°15-71 du 11 février 2015 fixant les conditions et modalités d'élaboration et d'adoption des Plans Particuliers d'Intervention pour les installations ou ouvrages (JORA n° 9, 2015) (Daas, 2020). Selon l'article 3, le Plan Particulier d'Intervention a pour objet de définir l'organisation et la coordination des secours en cas d'un risque particulier identifié et ayant des effets en dehors des limites de l'installation et l'ouvrage, en vue de protéger les personnes, les biens et l'environnement (Daas, 2020). Les Plans Particuliers d'Intervention (PPI) constituent la disposition particulière du plan ORSEC qui concerne tous les établissements classés pour la protection de l'environnement dont l'étude de danger conclut que les effets des risques particuliers identifiés peuvent dépasser les limites de l'établissement et causer ainsi des dommages aux personnes, aux biens et l'environnement (Daas, 2020).

  Le plan particulière d'intervention est définit pour les installations concernées un ensemble des mesures de prévention des risques, les moyens mobilisés ainsi que les procédures à mettre en œuvre lors du déclenchement d'un sinistre (Daas, 2020).

— Plan d'ORganisation de SECours (ORSEC). Ce plan est exigé par le décret exécutif n° 85-231 du 25 août 1985, fixant les conditions et les modalités d'organisation et de mise en œuvre des interventions et secours en cas de catastrophes (JORA n° 36, 1985) (Daas, 2020). C'est un instrument de prévention et de gestion des catastrophes naturelles ou industrielles. L'objectif de ce plan est de développer la préparation de tous les acteurs, publics ou privés, susceptibles d'intervenir dans le champ de la protection publique (Daas, 2020).

1.3.4. Les modèles des barrières de sécurité

Les barrières de sécurité sont utilisées dans les procédés industriels pour la maitrise des risques associés et donc gestion de la sécurité (Duijm, 2009). Le concept de barrières de sécurité a été clairement défini par Skelet (Sklet 2006). Les modèles de barrières les plus courants dans les applications de la sécurité des procédés sont le modèle de défense en profondeur (ou modèle de fromage suisse), le modèle du nœud papillon et le modèle LOPA. Ces modèles sont abordés dans la section suivante.

1.3.4.1. Modèle de défense en profondeur

Un des principaux contributeurs aux modèles des couches de protection est James Reason. Au début des années 1990, il élabore un cadre théorique capable de décrire et d'expliquer les accidents industriels (Reason, 1995). Pour Reason, un accident n'est pas dû à une simple erreur humaine et provient plutôt des interactions entre plusieurs facteurs à différents

niveaux d'un système. Il décrit les accidents comme le résultat de plusieurs facteurs de causalité qui se combinent pour créer une trajectoire d'accident à travers les multiples défenses d'un système.

Selon cette théorie, chaque étape d'un processus a un potentiel d'échec ou de défaillance. Chaque couche de défense est représentée par une tranche de fromage suisse, et les problèmes ou défaillances possibles dans cette défense sont représentées par les trous dans le fromage. Pour Reason, l'erreur humaine est inévitable et il est donc nécessaire pour les organisations de mettre en place des barrières pour les erreurs plutôt que d'essayer de les éliminer car il a reconnu l'éradication totale comme une tâche impossible (Reason, 2016).

La figure 1.14 illustre les quatre niveaux de défense sur lesquels ce modèle est fondé :

- Prévention des perturbations et les influences organisationnelles.
- Supervision et maintien l'installation dans la zone de conformité autorisée.
- Prévention de la détérioration des conditions préalables et limitation des impacts probables.
- Limitation des conséquences des actes dangereux en cas d'accident grave.

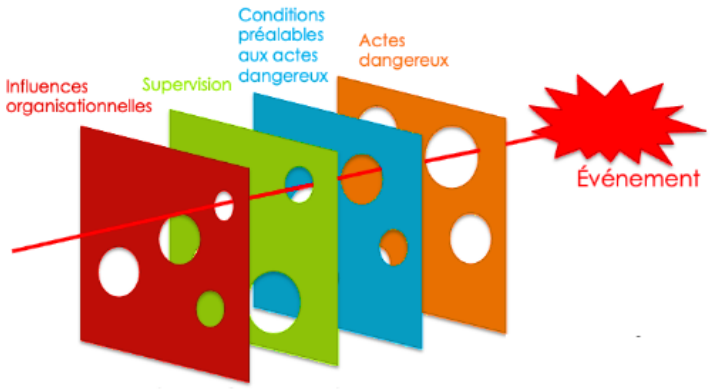


FIGURE 1.14 – Modèle de Reason (Reason, 2016).

1.3.4.2. Modèle du nœud papillon

La méthode de « nœud-papillon » a été utilisé dans pas mal des travaux de recherche (Zareia *et al.*, 2019 ; Acarbay *et al.*, 2022). Le nœud-papillon permet d'intégrer une large gamme de modèles causes- conséquences (figure 1.15). Le plus souvent, c'est le regroupement des arbres des défaillances (AdD), pour représenter les enchainements logiques conduisant à un événement redouté et l'arbre des événements (AdE) pour schématiser les différentes conséquences possibles.

Cette structure de nœud papillon a non seulement prouvé que c'était un concept intéressant dans la prédiction des accidents, mais il a également montré sa valeur pour l'analyse d'accident passé et la suggestion d'amélioration pour éviter leur récurrence (Tunçel *et al.*, 2023). En particulier, il permet d'obtenir un niveau de simplification correct des facteurs

causaux de manière à permettre de résumer un grand nombre de données en un relativement petit nombre de scénarios qui couvre la majorité des accidents.

La théorie derrière l'approche du nœud papillon se trouve dans le modèle de Reason du fromage suisse (De Ruijter *et al.*, 2016). Il définit plusieurs barrières de prévention et de protection pour réduire la fréquence et la gravité des conséquences potentielles (Badreddine *et al.*, 2014).

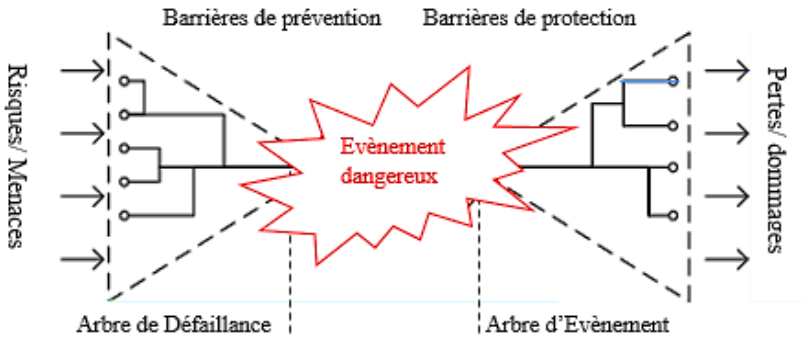


FIGURE 1.15 – Modèle du nœud papillon (NP).

1.3.4.3. Modèle LOPA

Le modèle LOPA (*Layer of Protection Analysis*) est l'une des méthodes les plus récentes développées par le Centre pour la sécurité des procédés chimiques (CCPS, 2001). La méthode a été appliquée pour l'évaluation de la sécurité des systèmes et procédés industriels chimiques, pétrochimiques et nucléaires (ISO/IEC 61511, 2016).

Lors de l'exécution d'une analyse des risques, les contraintes de sécurité sont évaluées pour justifier les risques atténués et contrôlés. A cet effet, la méthode LOPA permet d'évaluer toutes les couches de protection (barrières organisationnelles et techniques). La méthode LOPA permet d'évaluer la réduction des risques en analysant les contributions des différents niveaux de protection. Elle a été largement utilisé ces dernières années pour (Xu *et al.*, 2020 ; Sarafraz *et al.*, 2023) :

- Compléter l'analyse effectuée dans l'étude HAZOP (Park *et al.*, 2021), si le groupe de travail considère qu'un scénario donné est trop complexe ou si ces conséquences sont extrêmement importantes.
- Déterminer les niveaux SIL requis pour les fonctions instrumentés de sécurité (SIF).
- Évaluer l'impact des changements apportés au procédé ou au système de sécurité.
- Analyser plus en détail plusieurs scénarios d'accident.

Une autre façon de comprendre la méthode LOPA est de la considérer par rapport à d'autres méthodes d'évaluations des risques. Dans ce contexte, un scénario LOPA représente un

chemin (généralement, nous choisissons le chemin vers la pire conséquence) à travers un arbre d'événements (voir figure 1.16).

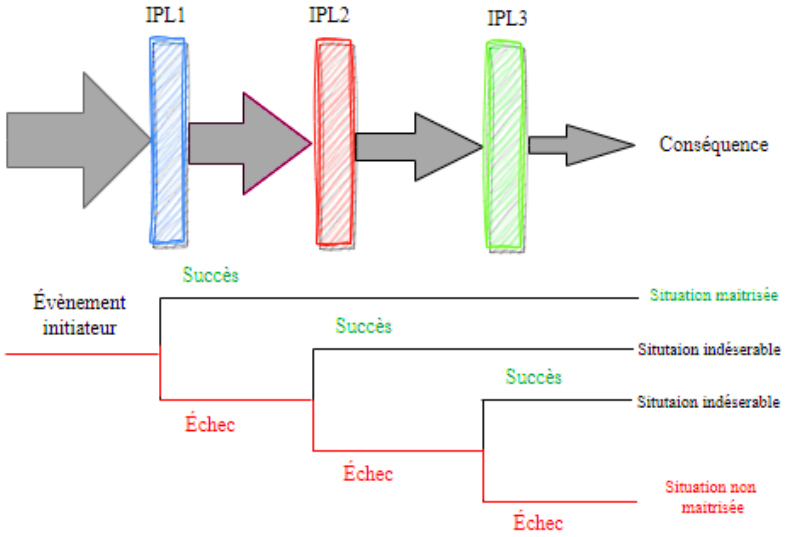


FIGURE 1.16 – Correspondance entre le principe LOPA et l'AdE.

La figure 1.17 représente les différents types de barrières de sécurité pouvant être considérées lors d'une étude LOPA.

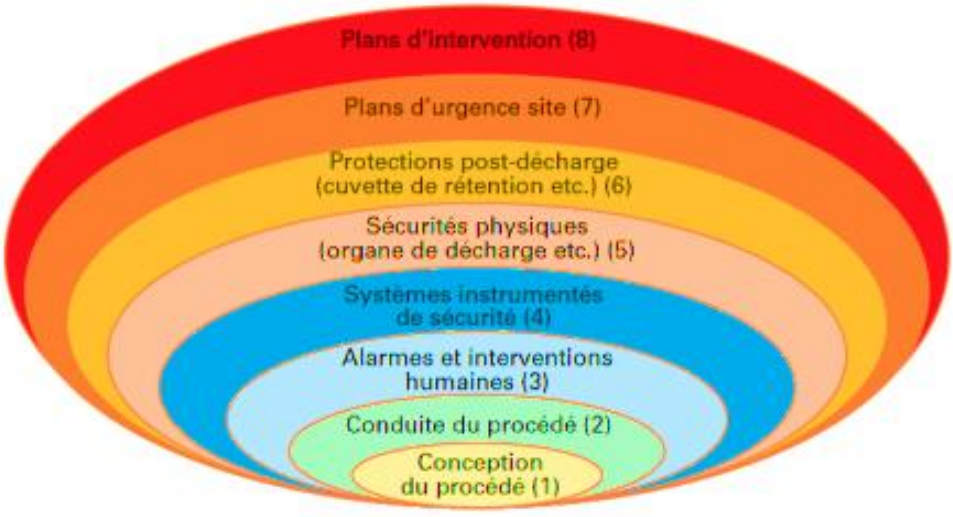


FIGURE 1.17 – Les couches de protection suivant le modèle LOPA (CCPS, 2001).

Une étude LOPA comporte généralement les étapes suivantes :

- Établissement des critères d'acceptabilité et sélection des scénarios d'accidents à évaluer.
- Élaboration de scénarios d'accidents.
- Identification des fréquences des événements initiateurs.
- Identification des couches de protection indépendante et des probabilités de leur défaillance à la demande.
- Détermination de la fréquence des scénarios d'accident.
- Évaluation des scénarios d'accident par rapport aux critères d'acceptabilité des risques.

1.4. Performance des barrières de sécurité

Les barrières de sécurité sont destinées à protéger la santé humaine, à minimiser les dommages aux biens et à l'environnement. Les barrières de sécurité d'urgence sont généralement prédéfinies dans les industries chimiques pour assurer une mise en œuvre rapide, ordonnée et efficace des mesures d'urgence. Les barrières de sécurité d'urgence peuvent être des dispositifs ou des actions individuelles ou un système complexe qui peut réduire la probabilité et les conséquences d'un accident (Bubbico *et al.*, 2020).

1.4.1. Concepts et définition

Xue *et al.*, (2013) explique dans ses travaux de recherche qu'afin d'assurer la prévention et l'atténuation des accidents majeurs, les barrières de sécurité sont utilisées sous diverses formes pour protéger les procédés chimique des événements indésirables en matière de sûreté et de sécurité et atténuer les conséquences potentiellement catastrophiques.

Récemment, plusieurs travaux de recherche ont porté sur la nécessité d'évaluer la fiabilité des barrières de sécurité (Misuri *et al.*, 2023 ; Di Maio *et al.*, 2023). L'accent mis également sur l'évaluation de la fiabilité des barrières de sécurité tient compte des réglementations européennes telles que la directive SEVESO III, comme l'ont montré Yu *et al.*, (2023) dans leurs travaux de recherche. Cette section clarifie les concepts de barrières de sécurité.

1.4.1.1. Barrière de sécurité

Les barrières de sécurité, ou moyens de maîtrise des risques, servent à réduire la probabilité d'un événement indésirable et/ou à atténuer ses conséquences. Une revue complète de Sklet, (2006) a révélé qu'il n'existe pas de définition universelle acceptée du concept « barrière de sécurité » tels que défense, défense en profondeur, couche de protection, fonction de sécurité, ni dans la littérature ni dans les réglementations européennes et les normes. L'examen de Sklet, (2006) suggère qu'une distinction doit être faite entre les termes « *barrière* » et « *fonction de barrière* », qui sont facilement confondus.

Johansen *et al.*, (2015) dans son article, il définit une barrière comme « *un moyen physique et/ou non physique destiné à prévenir, contrôler ou atténuer les événements indésirables ou les accidents* ». Les moyens peuvent varier d'une unité technique ou d'action humaine, à un système organisationnel complexe. D'une part, une barrière doit « réduire la probabilité d'un accident » ou « réduire ses conséquences ». D'autre part, selon Holland, (1997), une barrière de sécurité doit « empêcher le flux » et doit être capable d'empêcher un scénario d'accident de se dérouler et de progresser jusqu'aux conséquences indésirables. Il désigne également un ensemble d'éléments techniques et/ou organisationnels (Vinnem, 2010) nécessaires et suffisants pour assurer une fonction de sécurité (Markert *et al.*, 2013 ; Daas *et al.*, 2014,b).

Les fonctions des barrières de sécurité étaient étroitement liées à la classification des barrières de sécurité. La réalisation des fonctions de barrière peut être considérée comme le cœur d'un système de barrière de sécurité (Sklet, 2006 ; Liu, 2020). Les fonctions de la barrière de sécurité ont été décrites comme empêchant ou atténuant les événements ou accidents indésirables et protégeant les personnes, les installations et l'environnement des dommages correspondants (Yuan *et al.*, 2022).

1.4.1.2. Système de barrière

Un système de barrière est un système qui a été conçu et mis en œuvre pour remplir une ou plusieurs fonctions de barrière. Un système de barrière aura parfois plusieurs éléments de barrière qui remplissent une ou plusieurs fonctions de barrière comme par exemple un système instrumenté de sécurité (SIS) (Innal *et al.*, 2016). Les éléments barrières peuvent être définis comme des mesures techniques, opérationnelles ou organisationnelles qui participent à la réalisation d'une fonction barrière.

1.4.2. Classification des barrières de sécurité

La classification des barrières de sécurité se fait selon leur nature et selon le type de fonctionnement.

1.4.2.1. Classification des barrières de sécurité selon leur nature

Une classification des barrières de sécurité a été proposée par De Dianous *et al.*, (2006). Selon leur nature, les barrières de sécurité peuvent être catégorisées en trois types, à savoir les barrières de sécurité techniques (BST), les barrières de sécurité humaines (BSH) et les barrières impliquant des barrières humaines et techniques en même temps. Ces barrières sont appelées systèmes à action manuelle de sécurité, comme illustré dans la figure 1.18.

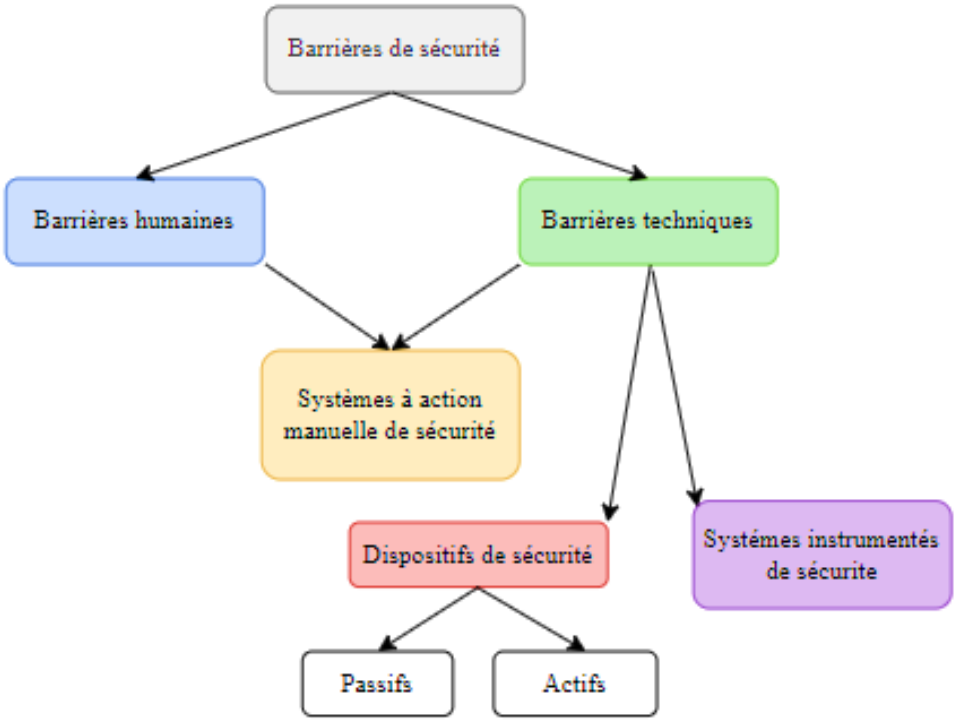


FIGURE 1.18 – Typologie des barrières de sécurité (De Dianous *et al.*, 2006).

1.4.2.1.1. Barrières technique de sécurité (BTS)

Ce type de barrière est généralement constitué d'un dispositif de sécurité (passif ou actif) ou d'un SIS qui prévient la survenance d'événements susceptibles de conduire à un accident.

- Dispositif de sécurité. Un dispositif de sécurité est généralement un élément unique et autonome dont le but est d'assurer une fonction de sécurité dans son ensemble. Les dispositifs peuvent être divisés en deux catégories :
  - *Dispositif passif*. Il s'agit d'un appareil qui ne nécessite aucun système mécanique pour remplir sa fonction de sécurité et ne nécessite aucune intervention humaine, opération de mesure technique, source d'énergie pour remplir sa fonction de sécurité.
  - *Dispositif actif*. Il s'agit d'un dispositif qui utilise un système mécanique pour remplir sa fonction. Il peut nécessiter une source d'alimentation pour remplir sa fonction.

- Système instrumenté de sécurité (SIS). Selon la norme ISO 61511 (ISO/IEC 61511, 2016), un SIS est une combinaison d'unités de captage, de traitement et d'actionneurs conçus pour assurer une ou plusieurs fonctions instrumentées de sécurité (SIF : *Safety Instrumented Function*). Le rôle assigné au SIS est la détection de situations dangereuses non maîtrisées pouvant conduire à un accident, puis la mise en œuvre d'un ensemble de réactions nécessaires à la sécurité dans les délais impartis. Plusieurs travaux de recherche ont été dédiés à l'évaluation de la fiabilité

des SIS (Omeiri *et al.*, (2022), Cai *et al.*, (2021), Innal *et al.*, (2016), Chebila et Innal (2015), …).

1.4.2.1.2. Barrières humaines de sécurité

Ils consistent en des activités humaines et des procédures sans l'utilisation de barrières techniques de sécurité qui empêcheraient un accident de se produire.

1.4.2.2. Classification des barrières de sécurité selon leur fonction

Selon le projet ARAMIS (ARAMIS, 2004), les fonctions des barrières de sécurité sont désignées par cinq verbes d'action permettent ainsi de couvrir l'ensemble des fonctions qu'il convient d'assurer pour maîtriser les risques d'accidents comme illustré dans la figure 1.19 :

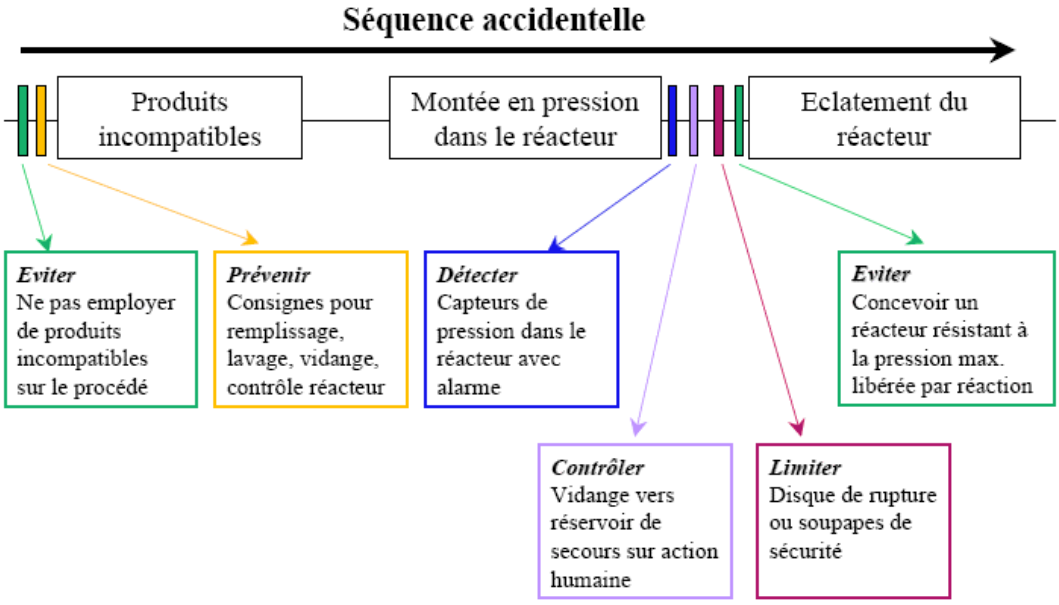


FIGURE 1.19 – Exemple d'identification des fonctions que doivent remplir des barrières de sécurité (ARAMIS, 2004).

- *Fonction d'évitement*. Le but de cette fonction est d'exclure toutes les causes possibles d'un évènement et de le rendre impossible. Il s'agit généralement d'une modification profonde des installations.
- *Fonction de prévention*. L'objectif de cette fonction est de réduire la probabilité d'un évènement en éliminant les causes possibles ou en réduisant leur gravité, mais sans le rendre impossible. Cette fonction couvre également les fonctions de détections.
- *Fonction de détection*. Cette fonction est utilisée pour détecter les déviations survenues dans le système. Cette fonction est généralement insuffisante pour assrer

la maitrise des accidents et doit être liée à d'autres fonctions telle que des fonctions de contrôles ou des limites.

— *Fonction de contrôle*. Il s'agit de contrôler l'évolution de la dérive d'une barrière pour ramener le système à un état de fonctionnement sécuritaire.
— *Fonction de réduction*. La fonction de limitation ou d'atténuation consiste à réduire la gravité d'un évènement et à agir sur sa gravité des conséquences.

1.4.3. Critère d'évaluation de la performance des barrières de sécurité

Le terme performance est introduit récemment dans les démarches de gestions des risques et d'évaluation des performances des barrières de sécurité (Meng *et al.*, 2018). D'après la norme CEI 61508 (IEC 61508, 2010), l'évaluation des performances d'une barrière de sécurité s'effectue à travers son indépendance, son efficacité, son temps de réponse et son niveau de confiance par rapport à son architecture, ses procédures de maintenance et ses procédures de test. 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 de sécurité (Simon *et al.*, 2007). La figure 1.20 représente la procédure de sélection d'une barrière de sécurité qui doit satisfaire au moins aux critères suivants :

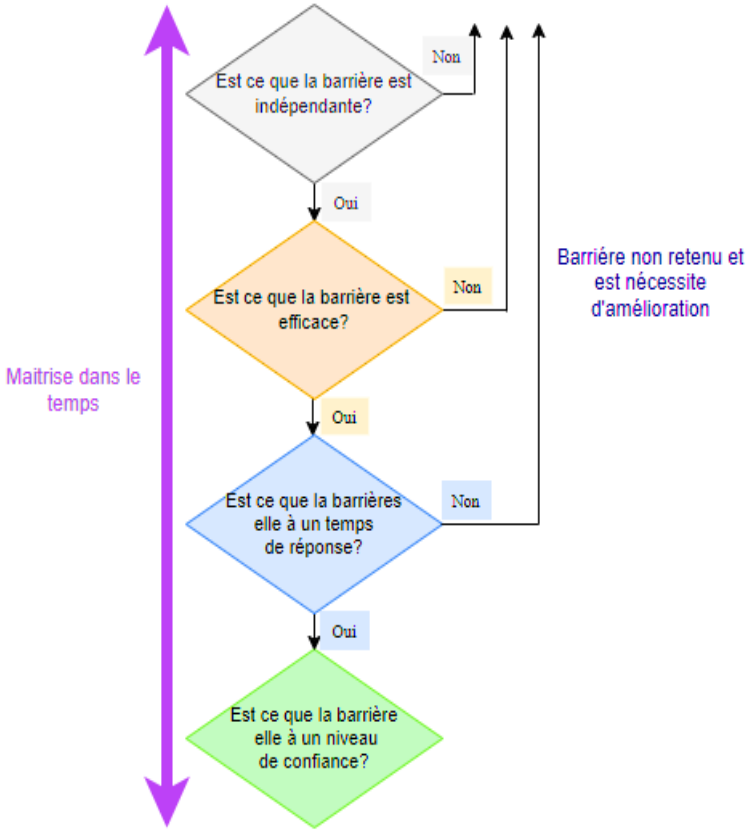


FIGURE 1.20 – Les critères de la performance des barrières de sécurité (Perinet, 2009).

- *Indépendance*. Selon Miche *et al.,* (2009) une barrière de sécurité doit être indépendante de l'événement initiateur pouvant conduire à son déclenchement pour être retenue comme barrière agissant sur le scénario déclenché par l'événement initiateur. Ses performances ne doivent pas être altérées par la survenance d'un événement initiateur. Elle doit également être indépendante des autres barrières de sécurité en termes de fonctionnement.
- *Efficacité*. C'est la capacité d'une barrière de sécurité (humaine ou technique) à remplir la fonction de sécurité pour laquelle elle a été choisie dans le cadre de son utilisation et pour la durée normale d'exploitation. L'efficacité de la barrière de sécurité est évaluée notamment pour un scénario d'accident particulier (Baybutt, 2014). La mesure d'efficacité s'exprime en pourcentage d'accomplissement de la fonction de sécurité définie, en considérant un fonctionnement normal de la barrière (non dégradé).
- *Temps de réponse*. Le temps de réponse correspond à l'intervalle de temps entre le moment où la barrière de sécurité est sollicitée et le moment où la fonction de sécurité assurée par cette barrière est pleinement réalisée.
- *Niveau de confiance*. L'évaluation de la probabilité d'occurrence de phénomènes dangereux intègre des facteurs de réduction des risques induits par les barrières de sécurité. Le niveau de confiance d'une barrière de sécurité est essentiel dans le sens où la probabilité de sa défaillance est cohérente avec l'objectif de réduction des risques. Dans les normes CEI 61508 et CEI 61511, l'évaluation des facteurs de réduction des risques repose sur trois aspects :

    - Contraintes d'architecture pour un SIL (safety integrity level) requis donné. Ces contraintes permettent de définir une architecture minimale au regard de la réduction nécessaire du risque (SIL requis).
    - Performances probabiliste telle que la probabilité moyenne de défaillance à la demande (PFD_{avg}).
    - Evitement et contrôle des défaillances systématiques, telles que les erreurs humaines, défauts de conception, erreurs logiciels, etc.

1.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté certains concepts, définitions et approches que nous avions jugés nécessaire à la compréhension de la suite de ce manuscrit. Dans un premier temps, nous avons essayé d'introduire des notions élémentaires liées à la gestion et à la maîtrise des risques d'accidents industriels : risques aléa et vulnérabilité. Ensuite, nous avons discuté la démarche de gestion des risques selon la norme ISO 31000 et des méthodes d'analyse des risques dédiées à l'appréciation des accidents industriels. Dans ce contexte, les méthodes HAZOP et analyse par arbre des événements (AdE) ont été présentées. En effet, la méthode HAZOP nous serait utile dans l'identification des événements contribuant aux scénarios d'accident. Par ailleurs, l'AdE permet le calcul de la fréquence d'occurrence de différents scénarios d'accidents.

De plus, nous avons fourni certaines statistiques des accidents industriels au niveau mondial et en Algérie. Les résultats de l'analyse statistique montrent que le pourcentage d'incendies et d'explosions est très élevé par rapport aux autres catégories d'accidents. Par ailleurs, les accidents industriels en Algérie sont dus majoritairement à des erreurs humaines. Dans le but de maitriser ces accidents majeurs, des dispositifs réglementaires ont été mis en place, particulièrement suite à l'accident du complexe GL1K en 2004. Nous avons passé en revue l'essentiel de la règlementation algérienne en la matière.

Aussi, des modèles de couches de protection tels que le modèle de Reason, LOPA et nœud papillon ont été exposés. Ces modèles permettent la maitrise du processus accidentel via la mise en œuvre de différentes barrières de sécurité. Finalement, ces barrières ont été abordées en termes de classification et de critères de performance. La classification est faite en fonction de la nature des barrières, d'une part, et selon leurs fonctions, d'autre part. Concernant les critères de performance, la fiabilité des barrières de sécurité constitue un critère de taille.

Dans cette optique, l'évaluation de la fiabilité des barrières de sécurité en présence d'incertitude, à travers l'évaluation de la probabilité de défaillance floue, fait l'objet du deuxième chapitre.

Chapitre 2

Evaluation de la probabilité de défaillance floue des barrières de sécurité d'urgence

2.1. Introduction

L'identification des scénarios d'accidents est une étape importante dans le processus d'évaluation des risques industriels. Les scénarios décrivent l'enchaînement des événements pouvant conduire à l'apparition de dommages importants. Ce n'est donc qu'à partir de ces scénarios que l'on peut estimer la fréquence d'occurrence et la gravité des conséquences d'un éventuel accident. Il est nécessaire d'évaluer le niveau de performance requis des barrières de sécurité et de juger l'acceptabilité des risques selon des critères prédéterminés (Khakzad *et al.*, 2013).

L'évaluation de la fiabilité des barrières de sécurité est une étape nécessaire dans l'analyse quantitative des risques (QRA) afin de s'assurer qu'elles sont capables de réaliser les réductions de risque qui leurs sont attribuées. Cependant, le manque des données numériques rend cette évaluation de cette fiabilité difficile et dans certains cas non pertinente. Si l'on fait appel aux jugements d'experts, les incertitudes surviennent en raison de la subjectivité inhérente à leurs jugements (manque d'expérience et du manque de connaissances). Il est donc indispensable de réduire ces incertitudes afin d'augmenter l'exactitude dans l'estimation des probabilités et donc renforcer la confiance dans les performances établies des barrières de sécurité.

Ce chapitre traite les incertitudes relatives à l'évaluation de la probabilité de défaillance des barrières de sécurité. Pour atteindre cet objectif, nous abordons la problématique de l'incertitude relative à la maitrise des accidents industriels. Puis nous décrivons la méthodologie proposée visant le calcul de la probabilité de défaillance floue des barrières de sécurité d'urgence.

2.2. Description de la méthodologie proposée

Dans le cadre de la méthodologie proposée, l'estimation de la probabilité de défaillance floue des barrières de sécurité d'urgence est basée sur une combinaison d'une extension de l'analyse par arbre d'événements, d'un ensemble flou d'intervalle de type 2 et de la méthode AHP (Daas *et al.*, 2023, b). Lorsque les données quantitatives ne sont pas disponibles, nous faisons recours au jugement des experts. Dans le contexte de ce travail de recherche, un ensemble flou d'intervalle de type 2 est proposé pour agréger les valeurs floues des avis d'experts. Une structure schématisant l'approche proposée est illustrée à la figure 2.1.

La première étape de cette approche se concentre sur l'analyse des risques via la méthode HAZOP et une analyse classique par arbre des événements. La deuxième étape consiste à estimer la probabilité de défaillance floue des barrières de sécurité d'urgence et les fréquences des différentes conséquences qui s'y associent, détaillées dans l'arbre des événements d'urgence. Cette deuxième étape se compose de quatre sous-étapes :

(1) Analyse des jugements d'experts en utilisant des ensembles flous d'intervalle de type 2 et la méthode AHP.

(2) Estimation des poids de chaque expert par l'application d'une procédure d'agrégation.
(3) Calcul de la probabilité de défaillance des barrières de sécurité d'urgence à l'aide de la formule d'Onisawa.
(4) Calcul de la fréquence d'occurrence des conséquences des situations d'urgence sur la base de l'analyse par arbre des événements d'urgence et des valeurs de la probabilité de défaillance de toutes les barrières de sécurité d'urgence. Une description détaillée de ces étapes est fournie dans les paragraphes suivants.

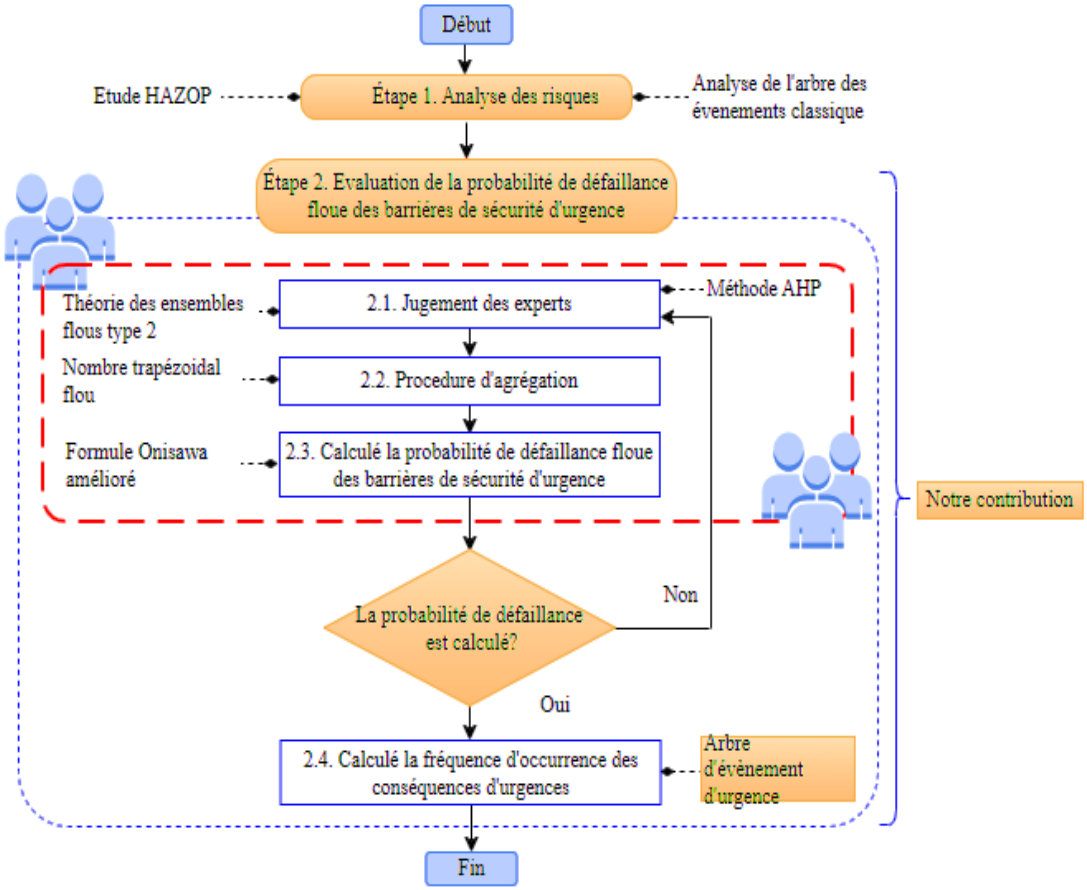


FIGURE 2.1 – La méthodologie proposée pour l'évaluation de la probabilité de défaillance floue des barrières de sécurité d'urgence (Daas *et al.*, 2023,b).

2.3. Problématique de l'incertitude dans la maitrise des accidents industriels

La problématique de la maitrise des accidents industriels est sujette à l'incertitude quant aux effets, aux conséquences néfastes, mais aussi à l'efficacité des barrières de sécurité adoptées. Wang *et al.*, (2019) propose une méthodologie intégrée pour évaluer la probabilité d'accident d'une station de distribution de gaz naturel avec prise en compte des incertitudes liées aux données. Zeng *et al.*, (2023), expliquent que dans les industries chimiques, les

accidents technologiques déclenchées par des événements à risque naturel et technologique (Natech) peuvent se multiplier. Des scénarios complexes multirisques en cascade avec de fortes incertitudes peuvent être engendrés (Chen *et al.,* 2023). Xu *et al.,* (2023) montrent que l'application de l'évaluation quantitative des risques (QRA) dans l'évaluation des accidents à effet dominos est difficile en raison des incertitudes dans le processus d'escalade. Par conséquent, les résultats QRA sont sujets à un certain degré de manque de fiabilité en raison d'une représentation inappropriée de l'incertitude. Afin de surmonter ce problème, les sources d'incertitude dans l'évaluation des accidents à effets dominos sont identifiées et classées. En outre, les méthodologies et approches actuelles utilisées pour traiter les diverses incertitudes (incertitude d'entrée, incertitude des paramètres du modèle et incertitude de la structure du modèle) dans le cadre QRA liées à l'effet domino ont été examinées (Daas *et al.,* 2015 ; Cheng *et al.,* 2023).

L'incertitude porte sur les différentes phases de la gestion des risques d'accident, depuis l'identification des scénarios jusqu'à l'évaluation de la fréquence d'occurrence de ces différents scénarios d'accidents majeurs, comme avancé par Kalilainen *et al.,* (2022). Cependant, cette incertitude au sens général du terme doit être redéfinie. Zhu *et al.,* (2023) explique que l'incertitude c'est en fait juste une forme particulière de nombreuses imperfections de l'information. Pour expliquer et tracer les processus d'expertise, les informations doivent être structurées pour les décrire sous des formes adaptées aux différents contextes décisionnels, mais aussi pour envisager leur intégration dans les systèmes d'information.

Pour étudier la fiabilité des barrières de sécurité, nous disposons d'informations généralement imparfaites et incertaines (He *et al.,* 2018). Plusieurs théories ont été développées par les chercheurs pour permettre l'évaluation et la manipulation de ces imperfections en termes des incertitudes et des imprécisions.

Butchvarov (1960) a abordé la problématique de l'incertitude à travers le concept de la probabilité. La théorie des probabilités fournit un aspect mathématique pour l'étude des phénomènes qui représentent des incertitudes aléatoires. En revanche, lors du calcul des erreurs, on s'est approché de l'imprécision des connaissances, qui se limitait aux imprécisions de nature numérique. Zadeh (Zadeh, 1965) est fondateur de la notion de sous-ensembles flous. Ce concept permet de représenter des connaissances imprécises et crée une interface entre les données décrites symboliquement et numériquement. Par la suite, Zadeh (Zadeh, 1978) a introduit la théorie des possibilités. La combinaison de la théorie des possibilités avec la théorie des sous-ensembles flous permet le traitement de connaissances imprécises et incertaines. D'autres approches existent pour le traitement de l'incertitude telle que l'analyse de Monte Carlo et la théorie des évidences. Dans ce qui suit, nous nous intéressons exclusivement aux approches fondées sur les ensembles flous.

2.4. Théories des ensembles floues pour le traitement de l'incertitude

Récemment, certains chercheurs sont concentrés sur le développement de modèles qui intègrent la théorie des ensembles flous (Kabir, 2023 ; Hong *et al.*, 2023 ; Leoni *et al.*, 2023 ; Ghasemi *et al.*, 2023), théorie des ensembles flous type 2 (Hong *et al.*, 2020) et théorie des ensembles flous intuitionniste pour estimer la probabilité d'occurrence des scénarios accidents ou la probabilité de défaillance des barrières de sécurité. Les différentes théories précédentes sont présentées dans ce qui suit.

2.4.1. Théorie des ensembles flous type 1

La théorie des ensembles flous est une théorie mathématique. Elle a été introduite par Lotfi Zadeh en 1965 (Zadeh, 1965). Soit l'ensemble flou A, sur l'univers de discours U est caractérisé par la fonction d'appartenance $\mu_A(x)$, qui prend ses valeurs dans l'intervalle $[0,1]$. Un ensemble flou est une généralisation d'un sous-ensemble ordinaire dont la fonction d'appartenance ne prend que deux valeurs 0 ou 1.

Un ensemble flou A dans U peut etre réprésenté comme un ensemble de paires ordonnées d'un élément générique x et de son degré d'appartenance :

$$A = \{(x, \mu_x(x))/x \in U\} \tag{2.1}$$

Quand l'univers de discours U est un ensemble continu, le sous ensemble flou A est décrit par l'Equation (2.2) comme suit :

$$A = \int \mu_x(x)/x \tag{2.2}$$

Quand U est discret, A s'est écrit comme suit :

$$A = \sum_U \mu_x(x)/x \tag{2.3}$$

2.4.1.1. Caractéristiques d'un ensemble flou

Citons les caractéristiques suivantes :

- *Support d'un ensemble flou*. Le support d'un ensemble flou, noté $\sup(A)$, est l'ensemble des éléments de U qui appartiennent au moins quelque peu à A. C'est la partie de U sur laquelle la fonction d'appartenance de A est non nulle comme présenté dans l'équation (2.4).

$$\sup(A) = \{x \in U/\mu_A(x) \neq 0\} \tag{2.4}$$

- *Hauteur d'un ensemble flou*. La hauteur, notée $h(A)$, d'un ensemble flou est le plus haut degré d'appartenance d'un élément U à A, c'est-à-dire la plus grande valeur que possède sa fonction d'appartenance comme indique l'équation (2.5).

$$h(A) = sup_{x \in X} \mu_A(x) \tag{2.5}$$

— *Noyau d'un ensemble flou*. Le noyau de l'ensemble flou normalisé A, noté $noy(A)$ comme représenté dans l'équation (2.6).

$$noy(A) = \{x \in U / \mu_A(x) = 1\} \tag{2.6}$$

2.4.1.2. Fonctions d'appartenance

Les formes les plus couramment utilisées pour les fonctions d'appartenance sont les formes triangulaire, trapézoïdale et gaussienne comme montré dans la figure 2.2.

— Soit l'ensemble flou triangulaire $a = (a_1, a_2, a_3)$, la fonction d'appartenance triangulaire est exprimé par l'équation (2.7) comme suit :

$$\mu_a(x) = \begin{cases} \frac{x-a_1}{a_2-a_1}; & a_1 \leq x \leq a_2 \\ 1; & x = a_2 \\ \frac{a_3-x}{a_3-a_2}; & a_2 < x \leq a_3 \end{cases} \tag{2.7}$$

— Soit l'ensemble flou trapézoïdale $a = (a_1, a_2, a_3, a_4)$, la fonction d'appartenance triangulaire est exprimé par l'équation (2.8) comme suit :

$$\mu_a(x) = \begin{cases} \frac{x-a_1}{a_2-a_1}; & a_1 \leq x \leq a_2 \\ 1; & a_2 \leq x \leq a_3 \\ \frac{a_4-x}{a_4-a_3}; & a_3 < x \leq a_4 \end{cases} \tag{2.8}$$

Où a_1, a_2, a_3 et a_4 sont les coordonnées des apex du trapèze. Si $a_3 = a_4$, nous obtenons une fonction d'appartenance $\mu_a(x)$ triangulaire.

— La fonction d'appartenance gaussienne est exprimée par l'équation (2.9) comme suit :

$$\mu(x) = exp\left(\frac{(-x-a)^2}{2\sigma^2}\right) \tag{2.9}$$

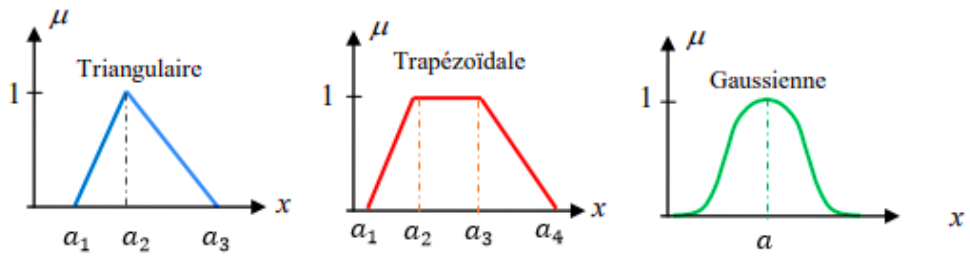


FIGURE 2.2 – Différentes fonctions d'appartenance.

2.4.1.3. Opérations sur les ensembles flous

La théorie des ensembles flous propose plusieurs opérateurs d'ensemble. Les principaux opérateurs et relations floues sont donnés ci-dessous (Zadeh, 1965).

— ***Inclusion.*** On dit qu'un ensemble flou A est inclus dans l'ensemble flou B et on note $A \in B$ si et seulement si :

$$\forall x \in U, \mu_A(x) \leq \mu_B(x) \tag{2.10}$$

— ***Egalité***. On dit qu'un ensemble flou A est inclus dans l'ensemble flou B et on note $A \in B$ si et seulement si :

$$\forall x \in U, \mu_A(x) = \mu_B(x) \tag{2.11}$$

Les autres opérations sur les ensembles flous comme le complément, l'intersection et union sont schématisées par la figure 2.3.

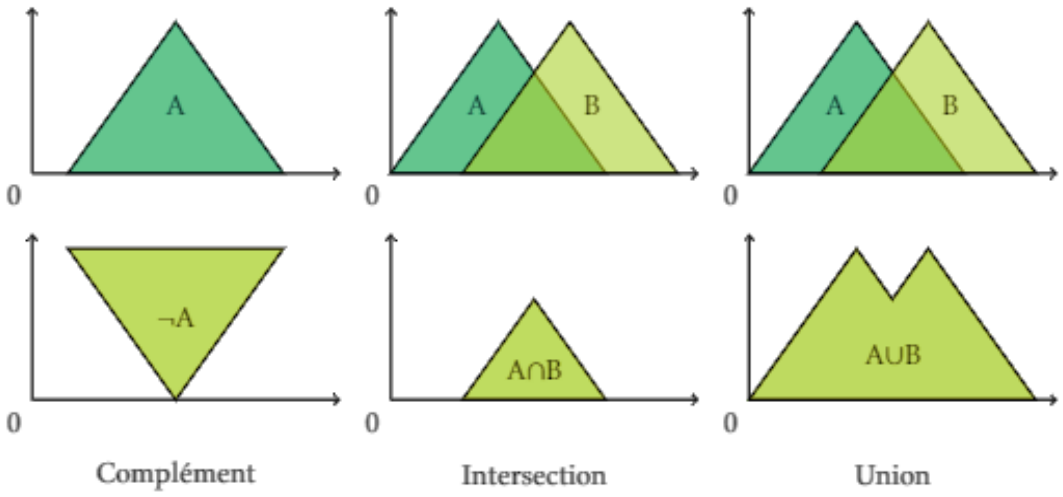


FIGURE 2.3 – Les différents opérations de deux ensembles flous A et B.

— ***Intersection***. On définit l'intersection de deux ensembles floues A et B et on note $A \cap B$, par le plus grand ensemble flou de contenu à la fois dans A et B, voir l'équation (2.12).

$$\forall x \in U, \mu_{A\cap B}(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x)) \tag{2.12}$$

— ***Union***. On définit l'union de deux ensemble floues A et B et on note $A \cup B$, par le plus petit ensemble flou de U qui contient à la fois A et B selon l'équation (2.13).

$$\forall x \in U, \mu_{A\cup B}(x) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad \text{Eq. (2.13)}$$

— ***Complément***. Selon la théorie des ensembles floues, l'opérateur "non" correspond à l'ensemble complémentaire, si et seulement si :

$$\forall x \in U, \mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x) \tag{2.14}$$

2.4.2. Théorie des ensembles flous type 2

La théorie des ensembles flous type 2 en tant qu'une extension de la théorie des ensembles flous conventionnelle a été introduite pour la première fois par (Zadeh, 1975). Le principe de base des deux théories est similaire. Cependant, la fonction d'appartenance de l'ensemble flou de type 1 est nette, tandis que la fonction d'appartenance de l'ensemble flou de type 2 est floue. En conséquence, un ensemble flou de type 2 peut exprimer un degré de flou plus élevé selon Celik *et al.*, (2015). De plus, l'ensemble flou de type 2 gère beaucoup mieux les incertitudes, car il fournit plus de paramètres différents par rapport à l'ensemble flou de type 1. La théorie des ensembles flous de type 2 est plus appropriée pour une utilisation dans des applications de cas réels (Kahraman *et al.*, 2014). La Figure 2.4 représente la fonction d'appartenance de l'ensemble flou de type 2. Les définitions des opérations mathématiques et les développements pas à pas sont présentés dans les équations (2.15) à (2.22) (Liang *et al.*, 2000).

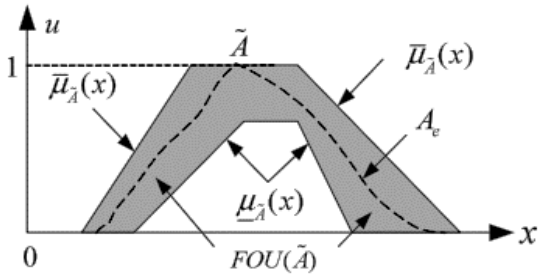


FIGURE 2.4 – La fonction d'appartenance de l'ensemble flou de type 2 (Wu *et al.*, 2007).

— Un ensemble flou de type 2, $\tilde{\tilde{A}}$, dans l'univers de discours X peut être représenté par une fonction d'appartenance de type 2, $\mu_{\tilde{\tilde{A}}}(x)$, représentée par l'équation (2.15):

$$\tilde{\tilde{A}} = \left\{((x,u), \mu_{\tilde{\tilde{A}}}(x,u)) \,\middle|\, \forall x \in X, \forall u \in J_x \in [0,1], 0 \leq \mu_{\tilde{\tilde{A}}}(\mathrm{x},\mathrm{u}) \leq 1\right\} \qquad (2.15)$$

Où J_x désigne un intervalle [0,1]. L'ensemble flou de type 2, $\tilde{\tilde{A}}$ peut aussi être représenté par l'équation (2.16):

$$\tilde{\tilde{A}} = \int_{x\in X} \int_{u\in J_x} \mu_{\tilde{\tilde{A}}}(x,u) \Big/ (x,u) \qquad (2.16)$$

Où $J_x \in [0,1]$ et le signe "$\int$" désignent l'union sur tous les x et u admissibles.

— Soit $\tilde{\tilde{A}}$ un ensemble flou de type 2 dans l'univers de discours X représenté par la fonction d'appartenance de type 2, $\mu_{\tilde{\tilde{A}}}$. Si tout $\mu_{\tilde{\tilde{A}}}(x,u) = 1$, alors $\tilde{\tilde{A}}$ est appelé un ensemble flou d'intervalle de type 2 (Buckley, 1985). Un ensemble flou de type 2 d'intervalle $\tilde{\tilde{A}}$ peut être considéré comme un cas particulier d'ensemble flou de type 2 (Mendel *et al.*, 2006), représenté par l'équation (2.17) :

$$\tilde{\tilde{A}} = \int_{x \in X} \int_{u \in J_x} {}^{1}/_{(x,u)} \tag{2.17}$$

— Les opérations arithmétiques avec des ensembles flous de type 2 à intervalles triangulaires sont données ci-après. Les fonctions d'appartenance supérieure et inférieure d'un ensemble d'intervalle de type 2 sont des fonctions d'appartenance de type 1. Un ensemble flou de type 2 à intervalle triangulaire est illustré par l'équation (2.18):

$$\tilde{\tilde{A}}_i = \left(\tilde{A}_i^U;\ \tilde{A}_i^L\right) = \left(\left(\ a_{i1}^U, a_{i2}^U, a_{i3}^U; H\left(\tilde{A}_i^U\right)\right), \left(\ a_{i1}^L, a_{i2}^L, a_{i3}^L; H\left(\tilde{A}_i^L\right)\right)\right) \tag{2.18}$$

Où $\tilde{A}_i^U$ et $\tilde{A}_i^L$ sont des ensembles flous de type 1, $a_{i1}^U,\ a_{i2}^U,\ a_{i3}^U, a_{i1}^L, a_{i2}^L$ et a_{i3}^L sont les points de référence de l'intervalle de l'ensemble flou de type-2. $H\left(\tilde{A}_i^U\right)$ désigne la valeur d'appartenance de l'élément a_{i2}^U dans la fonction d'appartenance triangulaire supérieure. $H\left(\tilde{A}_i^L\right)$ désigne la valeur d'appartenance de l'élément a_{i2}^L dans la fonction d'appartenance triangulaire inférieure. $H\left(\tilde{A}_i^L\right) \in [0,1]$, $H\left(\tilde{A}_i^L\right) \in [0,1]$ et $1 \leq i \leq n$ (Chen *et al.*, 2010).

— Soit $\tilde{\tilde{A}}_1 = \left(\left(\ a_{11}^U, a_{12}^U, a_{13}^U; H\left(\tilde{A}_1^U\right)\right), \left(\ a_{11}^L, a_{12}^L, a_{13}^L; H\left(\tilde{A}_1^L\right)\right)\right)$ et $\tilde{\tilde{A}}_2 = \left(\left(\ a_{21}^U, a_{22}^U, a_{23}^U; H\left(\tilde{A}_2^U\right)\right), \left(\ a_{21}^L, a_{22}^L, a_{23}^L; H\left(\tilde{A}_2^L\right)\right)\right)$ sont des ensembles flous de type 2 à intervalles triangulaires. Les opérations algébriques des ensembles flous de type 2 à intervalles triangulaires (Chen *et al.*, 2010) sont données par:

— L'opération d'addition entre $\tilde{\tilde{A}}_1$et $\tilde{\tilde{A}}_2$ est définie par l'équation (2.19) :

$$\tilde{\tilde{A}}_1 \oplus \tilde{\tilde{A}}_2 = \left(\left(a_{11}^U + a_{21}^U,\ a_{12}^U + a_{22}^U,\ a_{13}^U + a_{23}^U;\ \min\left(H\left(\tilde{A}_1^U\right);\ H\left(\tilde{A}_2^U\right)\right), min\left(H\left(\tilde{A}_1^U\right);\ H\left(\tilde{A}_2^U\right)\right)\right), \left(a_{11}^L + a_{21}^L, a_{12}^L + a_{22}^L,\ a_{13}^L + a_{23}^L;\ min\left(\left(\tilde{A}_1^U\right);\ H\left(\tilde{A}_2^U\right)\right), min\left(H\left(\tilde{A}_1^U\right);\ H\left(\tilde{A}_2^U\right)\right)\right)\right) \tag{2. 19}$$

— L'opération de soustraction entre $\tilde{\tilde{A}}_1$et $\tilde{\tilde{A}}_2$ est définie par l'équation (2.20):

$$\tilde{\tilde{A}}_1 - \tilde{\tilde{A}}_2 = \left(\left(a_{11}^U - a_{23}^U,\ a_{12}^U - a_{22}^U,\ a_{13}^U - a_{21}^U;\ \min\left(H\left(\tilde{A}_1^U\right);\ H\left(\tilde{A}_2^U\right)\right), min\left(H\left(\tilde{A}_1^U\right);\ H\left(\tilde{A}_2^U\right)\right)\right), \left(a_{11}^L - a_{23}^L, a_{12}^L - a_{22}^L,\ a_{13}^L - a_{21}^L;\ min\left(\left(\tilde{A}_1^U\right);\ H\left(\tilde{A}_2^U\right)\right), min\left(H\left(\tilde{A}_1^U\right);\ H\left(\tilde{A}_2^U\right)\right)\right)\right) \tag{2.20}$$

— L'opération de multiplication entre $\tilde{\tilde{A}}_1$ et $\tilde{\tilde{A}}_2$ est définie par l'équation (2.21):

$$\tilde{\tilde{A}}_1 \otimes \tilde{\tilde{A}}_2 = \left(\left(a_{11}^U \otimes a_{21}^U,\ a_{12}^U \otimes a_{22}^U,\ a_{13}^U \otimes a_{23}^U; \min\left(H(\tilde{A}_1^U);\ H(\tilde{A}_2^U)\right), min\left(H(\tilde{A}_1^U);\ H(\tilde{A}_2^U)\right)\right), \left(a_{11}^L \otimes a_{21}^L, a_{12}^L \otimes a_{22}^L,\ a_{13}^L \otimes a_{23}^L;\ min\left((\tilde{A}_1^U);\ H(\tilde{A}_2^U)\right), min\left(H(\tilde{A}_1^U);\ H(\tilde{A}_2^U)\right)\right)\right) \quad (2.\ 21)$$

— Les opérations de multiplication et de division entre $\tilde{\tilde{A}}_1$ et la valeur nette k (singleton) sont définies par l'équation (2.22):

$$\begin{cases} k\tilde{\tilde{A}}_1 = \left(\left(k \times a_{11}^U, k \times a_{12}^U, k \times a_{13}^U; H(\tilde{A}_1^U)\right), \left(k \times a_{11}^L, k \times a_{12}^L, k \times a_{13}^L; H(\tilde{A}_1^L)\right)\right) \\ \frac{\tilde{\tilde{A}}_1}{k}\left(\left(\frac{1}{k} \times a_{11}^U, \frac{1}{k} \times a_{12}^U, \frac{1}{k} \times a_{13}^U; H(\tilde{A}_1^U)\right), \left(\frac{1}{k} \times a_{11}^L, \frac{1}{k} \times a_{12}^L, \frac{1}{k} \times a_{13}^L; H(\tilde{A}_1^L)\right)\right) \end{cases}, \quad (2.22)$$

,

2.4.3. Théorie des ensembles flous intuitionnistes

La théorie des ensembles flous intuitionniste a été utilisée dans de nombreux articles de recherche pour évaluer la fiabilité des barrières de sécurité (Panchal, 2023 ; Kumar *et al.*, 2023 ; Yousofnejad *et al.*, 2023 ; Daas *et al.*, 2024,e). Yazdi *et al.*, (2023) et (Kaushik *et al.*, 2023) ont discuté du problème que plusieurs méthodes d'évaluation de la fiabilité des systèmes, telles que l'analyse des modes de défaillance et de leurs effets (AMDE), l'analyse par arbre de défaillance et les réseaux bayésiens (BN), s'appuient sur des données précises sur les défaillances des composants du système. Pour résoudre le problème de l'incertitude des données comme montre Kabir, 2023 dans ses travaux de recherche, une méthodologie basée sur une combinaison de la théorie des ensembles flous intuitionnistes et de l'élicitation d'experts a été proposée, permettant l'évaluation de la fiabilité des systèmes via l'arbre de défaillances. Chachra *et al.*, (2023) ont proposés une nouvelle technique impliquant des nombres flous intuitionnistes triangulaires (TrIFN) et la méthode fonction génératrice universelle pour l'évaluation de la fiabilité d'un système multi-états flou.

Dans ce qui suit, nous présentons brièvement la théorie des ensembles flous intuitionnistes. La figure 2.5, représente un nombre flou intuitionniste triangulaire.

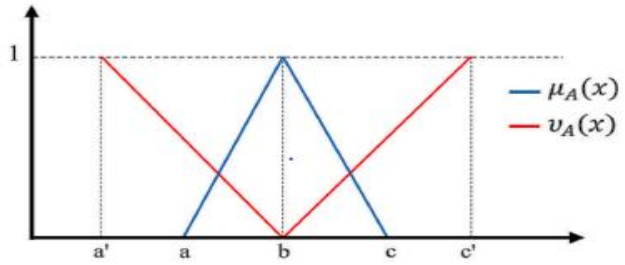


FIGURE 2.5 – Nombre flou intuitionniste (Kaur, 2014, Daas *et al.*, 2024, e).

— Etant donné un ensemble fixe $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, un ensemble flou intuitionniste $\bar{\bar{A}}$ est défini par l'équation (2.23) comme suit :

$$\bar{\bar{A}} = ((x_i, \mu_A(x_i), v_A(x_i))/\ x_i \in X) \tag{2.23}$$

Ce qui affecte à chaque élément x_i un degré d'appartenance $\mu_A(x_i)$ et un degré de non appartenance $v_A(x_i)$ sous la condition $0 \leq \mu_A(x_i) + v_A(x_i) \leq 1$, pour tout $x_i \in X$.

— Un nombre flou intuitionniste triangulaire (TrIFN), noté $\bar{\bar{A}}_{TrIFN} = (a_1, a_2, a_3;\ a_1', a_2', a_3')$. Les fonctions d'appartenance $\mu_{\bar{\bar{A}}}(x)$ et de non-appartenance $v_{\bar{\bar{A}}}(x)$ sont définies par les équations (2.24) et (2.25) :

$$\mu_{\bar{\bar{A}}}(x) = \begin{cases} \frac{x-a_1}{a_2-a_1}, & a_1 \leq x \leq a_2 \\ \frac{a_3-x}{a_3-a_2}, & a_2 \leq x \leq a_3 \\ 0, & Sinon \end{cases} \tag{2.24}$$

$$v_{\bar{\bar{A}}}(x) = \begin{cases} \frac{a_2-x}{a_2-a_1'}, & a_1' \leq x \leq a_2 \\ \frac{x-a_2}{a_3-a_2'}, & a_2 \leq x \leq a_3' \\ 0, & Sinon \end{cases} \tag{2.25}$$

Où $a_1' \leq a_1 \leq a_2 \leq a_3 \leq a_3'$ et $\mu_{\bar{\bar{A}}}(x), v_{\bar{\bar{A}}}(x) \leq 0.5$ pour $\mu_{\bar{\bar{A}}}(x) = v_{\bar{\bar{A}}}(x), \forall x \in R$.

— Opérations arithmétiques des nombres flous intuitionnistes triangulaires. Si $\bar{\bar{A}} = (a_1, a_2, a_3;\ a_1', a_2', a_3')$ et $\bar{\bar{B}} = (b_1, b_2, b_3;\ b_1', b_2', b_3')$ sont deux TrIFN, alors on définit ce qui suit :

- Addition de $\bar{\bar{A}}$ et $\bar{\bar{B}}$:

$$\bar{\bar{A}} \oplus \bar{\bar{B}} = (a_1, a_2, a_3;\ a_1', a_2', a_3') \oplus (b_1, b_2, b_3;\ b_1', b_2', b_3')$$

$$\bar{\bar{A}} \oplus \bar{\bar{B}} = (a_1 \oplus b_1, a_2 \oplus b_2, a_3 \oplus b_3;\ a_1' \oplus b_1', a_2' \oplus\ b_2', a_3' \oplus b_3') \tag{2.26}$$

- Multiplication de $\bar{\bar{A}}$ et $\bar{\bar{B}}$:

$$\bar{\bar{A}} \otimes \bar{\bar{B}} = (a_1, a_2, a_3;\ a_1', a_2', a_3') \otimes (b_1, b_2, b_3;\ b_1', b_2', b_3')$$

$$\bar{\bar{A}} \otimes \bar{\bar{B}} = (a_1 b_1, a_2 b_2, a_3 b_3;\ a_1' b_1', a_2' b_2', a_3' b_3') \tag{2.27}$$

$$k \otimes \bar{\bar{A}} = (ka_1, ka_2, ka_3;\ ka_1', ka_2', ka_3') \tag{2.28}$$

2.5. Jugement d'experts et méthodes d'agrégations

Ces dernières années, certains chercheurs se sont concentrés sur le développement de modèles qui intègrent l'élicitation d'experts ou l'opinion d'experts avec des méthodes d'agrégation pour estimer la probabilité de défaillance des barrières de sécurité (Laal *et al.*, 2020). Cette section traite l'importance de jugement d'experts et les méthodes d'agrégation.

2.5.1. Jugement d'experts

Le problème du jugement d'expert a été introduit dans de nombreux travaux de recherche lorsque la problématique de l'incertitude a été soulevée. La question émergente concerne, d'une part, la qualité et la fiabilité des informations et des avis d'experts et, d'autre part, le choix des modalités de traitement des avis d'experts. A cette fin, Zarei *et al.*, (2017) ont démontré que la théorie des ensembles flous dispose d'outils puissants pour traiter les jugements subjectifs des experts. Il existe plusieurs méthodes pour l'évaluation des jugements d'experts à savoir la méthode AHP, TOPSIS (Yazdi *et al.*, 2020) et la méthode Dematel (Kuzu, 2023).

2.5.1.1. La méthode AHP

La méthode AHP (Analytic Hierarchy Process) a été proposée par Saaty (Saaty, 1980) comme une méthode de prise de décision multicritères. Elle est simple dans son principe et dans son application. Cette simplicité est expliquée par le nombre important de travaux scientifiques où la méthode AHP a été appliquée avec succès (Yazdi *et al.*, 2018).

La méthode AHP est appliquée en décomposant un problème non structuré en composants. Ces composants sont traduits par des critères et des alternatives. Les niveaux hiérarchiques sont organisés en formant des structures hiérarchiques avec le but (objectif) en haut de la hiérarchie, les critères affectant la décision au niveau intermédiaire et les options de décision (alternatives) en bas de la hiérarchie comme illustré dans la figure 2.6. La description des étapes de la méthode AHP est donnée dans le paragraphe suivant.

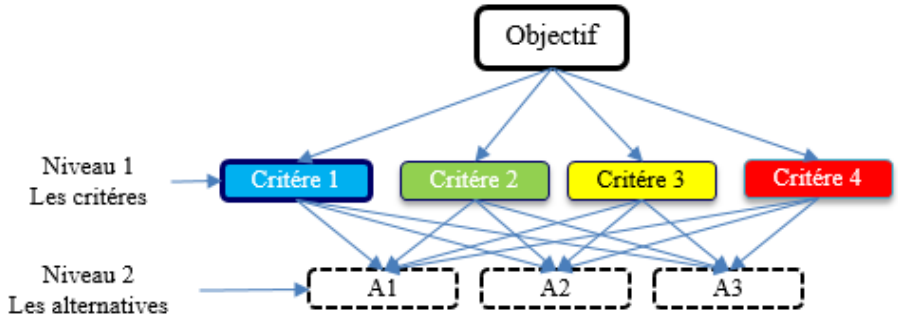


FIGURE 2.6 – La structure hiérarchique de la méthode Analytic Hierarchy Process.

— ***Etape 1***. Elaboration d'une matrice de la comparaison binaire $A = (a_{ij})$ d'ordre $m \times m$ comme illustré dans l'équation (2.29).

$$A = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \dots\dots & a_{1n} \\ \frac{1}{a_{21}} & 1 & \dots\dots & a_{2n} \\ \dots. & & \dots. & \dots. \\ \frac{1}{a_{i1}} & \frac{1}{a_{i2}} & \dots\dots & 1 \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

Selon Saaty (Saaty, 2007), cette matrice des jugements par paires doit être positive et vérifie la condition de réciprocité. C'est-à-dire, $a_{ij} > 0$ et $a_{ij} \times a_{ji} = 1$.

— ***Etape 2***. Pour établir des comparaisons par paires, la méthode AHP utilise une échelle de valeurs absolues comprises entre 1 et 9 nommée échelle de Saaty. C'est une échelle sémantique décrivant l'importance d'un critère sur un autre, voir le tableau 2.1.

— ***Etape 3***. Déterminer l'importance relative des critères en calculant les vecteurs de pondération W correspondants aux valeurs propres maximales des matrices de comparaisons. Le vecteur de pondération W est un vecteur colonne de dimension $(n \times 1)$. Chaque terme w_i du vecteur correspond à la pondération du critère (C_1) relativement aux attributs exprimés dans la matrice A. Les termes w_i sont définis à partir de chaque ligne de la matrice normalisée A_{Nor} comme montré dans la figure 2.7. Les termes w_i sont définis par les équations (2.30) et (2.31) :

$$w_i = {SL_i}/{n} \quad (2.30)$$

$$SL_i = {1}/{SC_j} + \sum_{k=1,k\neq j}^{n} {a_{jk}}/{SC_j} \quad (2.31)$$

Où, w_i est le vecteur de pondération, SL_i et SC_j sont respectivement la somme des lignes et des colonnes de la matrice A et n est le nombre des critères.

TABLEAU 2.1– Echelle de Saaty (Saaty, 1980).

Degré d'importance	Définition
1	Importance égale des deux critères.
3	Faible importance d'un critère par rapport à un autre.
5	Importance forte ou déterminante d'un critère par rapport à un autre.
7	Importance attestée d'un critère par rapport à un autre.
9	Importance absolue d'un critère par rapport à un autre.
2, 4, 6, 8	Valeurs intermédiaires entre deux appréciations voisines.
Réciprocité	Si le critère i se voit attribuer l'un des chiffres précédents lorsqu'elle est comparée au critère j, ce dernier aura donc la valeur inverse lorsqu'on le compare à i.

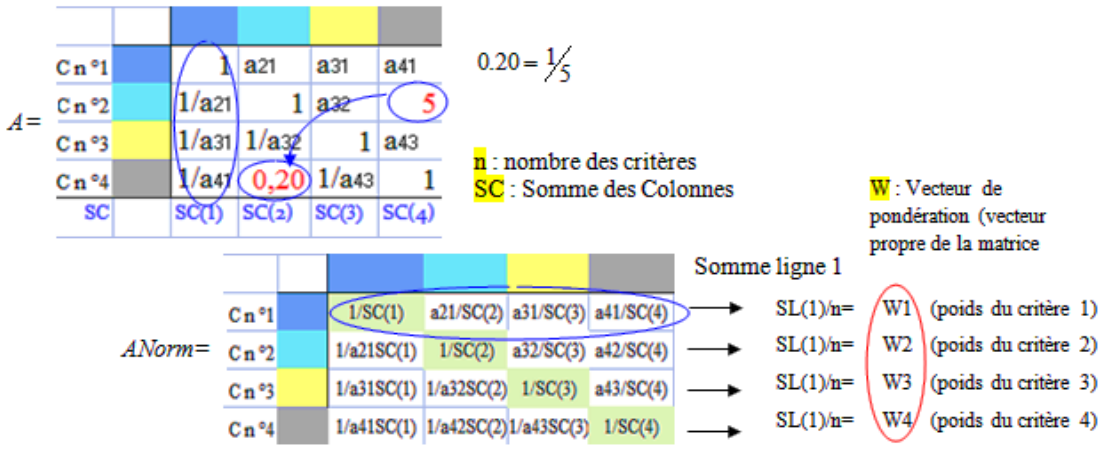


FIGURE 2.7 – Normalisation de la matrice et calcul du vecteur de pondération.

Un exemple numérique pour quatre critères illustre le passage de la matrice A à la matrice normalisé A_{Nor} et aussi le calcul de la pondération des critères (figure 2.8).

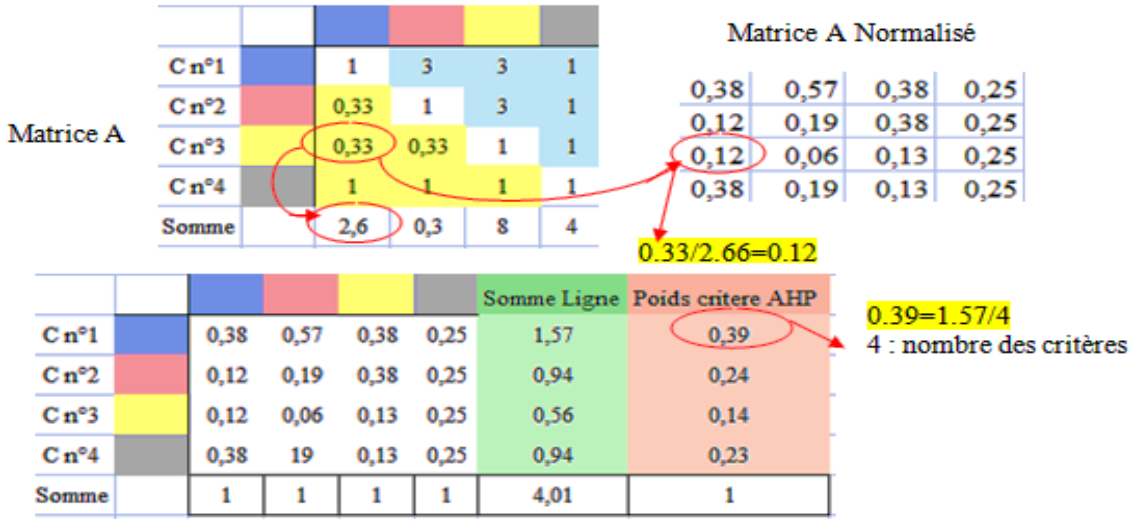


FIGURE 2.8 – Illustrative numérique de normalisation de la matrice et calcul du vecteur de pondération.

— ***Etape 4***. La validité de l'estimation des priorités w_i dépend du degré de consistance de la matrice des jugements d'experts par paires. Pour vérifier cette consistance, on applique la démarche suivante :

- Calcul de l'indice de cohérence IC de chaque critère à partir du produit de la matrice A et du vecteur de pondération en utilisant successivement les relations :

$$\lambda_{max} = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} a_{ij} \times w_i \qquad (2.32)$$

$$IC = \frac{\lambda_{max} - n}{n-1} \quad (2.33)$$

- Détermination de l'indice aléatoire (IA) à partir du tableau 2.2.

TABLEAU 2.2– Les Indices Aléatoire (IA).

n (critère)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Indice Aléatoire	0	0	0.58	0.90	1.12	0.24	0.32	1.41	1.45	1.49

- Détermination du ratio de cohérence RC en utilisant l'équation (2.34) :

$$RC = {}^{IC}/_{IA} \quad (2.34)$$

Le RC doit inférieur à 10% pour valider la consistance des résultats. La figure 2.9 présente un exemple de calcul de RC.

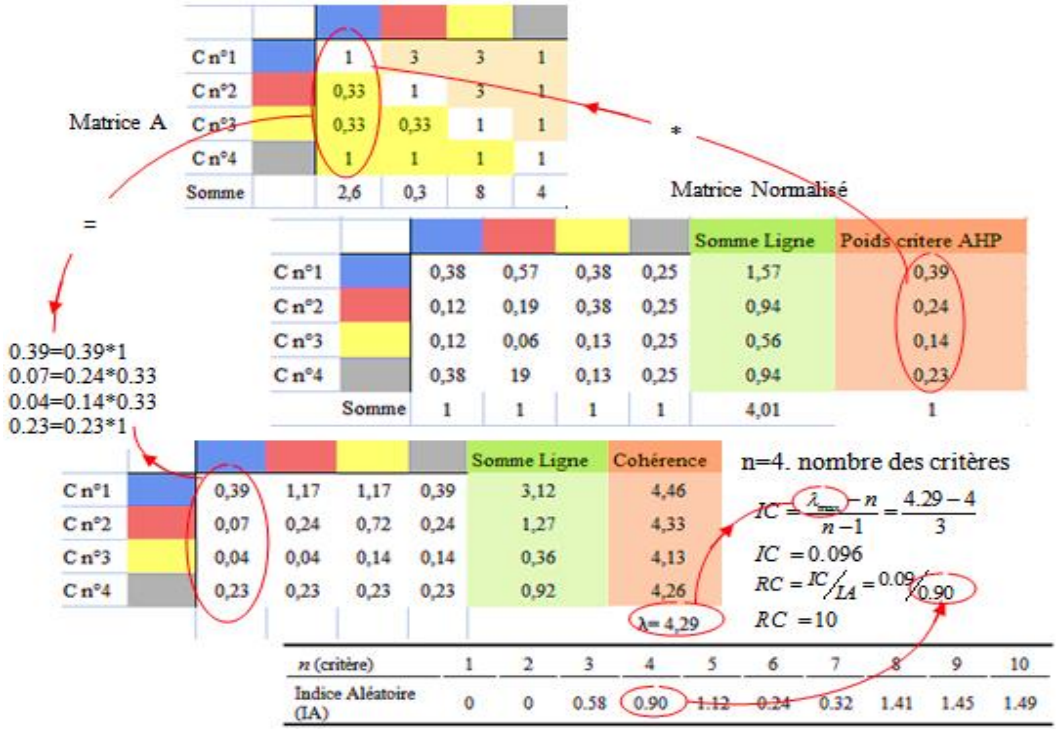


FIGURE 2.9 – Exemple numérique sur le calcul de IA et RC.

2.5.1.2. Méthode AHP floue type 2

Afin de gérer les inévitables imprécisions, une nouvelle méthode appelée le processus de hiérarchie analytique floue (FAHP) a été développée par Buckley, (1985). La subjectivité de jugement des experts doit être considérée afin d'obtenir des résultats plus crédibles et

fiables. La méthode AHP floue de type 1 de Buckley (Buckley, 1985) a été modifiée en utilisant des ensembles flous d'intervalle de type 2 (Chen *et al.*, 2010 ; Ahmed *et al.*, 2023). La procédure de cette méthode AHP floue de type 2 est expliquée dans ce qui suit (Chen *et al.*, 2019).

(1) Des matrices de comparaison floues par paires sont créées entre tous les critères dans les dimensions du système hiérarchique (Chen *et al.*, 2013 ; Daas *et al.*, 2023, b-d-e). Les avis d'experts en termes quantifiables sont attribués en tenant compte de l'importance de la comparaison par paire donnée par les équations (2.35) et (2.36) :

$$\tilde{\tilde{A}} = \begin{bmatrix} 1 & \tilde{\tilde{a}}_{12} & \dots\dots & \tilde{\tilde{a}}_{1n} \\ \tilde{\tilde{a}}_{21} & 1 & \dots\dots & \tilde{\tilde{a}}_{2n} \\ \dots. & & \dots. & \dots. \\ \tilde{\tilde{a}}_{n1} & \tilde{\tilde{a}}_{n2} & \dots\dots & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \tilde{\tilde{a}}_{12} & \dots\dots & \tilde{\tilde{a}}_{1n} \\ 1/\tilde{\tilde{a}}_{21} & 1 & \dots\dots & \tilde{\tilde{a}}_{2n} \\ \dots. & & \dots. & \dots. \\ 1/\tilde{\tilde{a}}_{n1} & 1/\tilde{\tilde{a}}_{2n} & \dots\dots & 1 \end{bmatrix} \quad (2.35)$$

$$1/\tilde{\tilde{a}} = \left(\left(\frac{1}{\tilde{a}_{13}^{U}}, \frac{1}{\tilde{a}_{12}^{U}}, \frac{1}{\tilde{a}_{11}^{U}}; H_1(a_{12}^{U}) \right), \left(\frac{1}{\tilde{a}_{23}^{L}}, \frac{1}{\tilde{a}_{22}^{L}}, \frac{1}{\tilde{a}_{21}^{L}}; H_1(a_{22}^{L}) \right) \right) \quad (2.36)$$

Le critère i est d'une importance relative par rapport au critère j, $\tilde{\tilde{a}}_{ij} = \tilde{\tilde{1}}, \tilde{\tilde{3}}, \tilde{\tilde{5}}, \tilde{\tilde{7}}, \tilde{\tilde{9}}$. Dans la situation $i = j$, $\tilde{\tilde{a}}_{ij} = 1$. Les variables linguistiques qui peuvent être utilisées dans la méthode AHP floue d'intervalle de type 2, sont données dans le tableau 2.3.

Afin de facilité les calculs, nous avons utilisé le code de la méthode AHP floue d'intervalle de type 2 dans le logiciel Matlab (voir Annexe (B)).

(2) En utilisant la méthode de la moyenne géométrique, les poids flous ($\tilde{\tilde{r}}_i$) des dimensions sont calculés par l'équation (2.37):

$$\tilde{\tilde{r}}_i = \left(\tilde{\tilde{a}}_{i1} \otimes \tilde{\tilde{a}}_{i2} \otimes \dots. \otimes \tilde{\tilde{a}}_{in} \right)^{1/n} \quad (2.37)$$

(3) Pour chaque critère, les poids flous sont définis par l'équation (2.38):

$$\tilde{\tilde{w}}_i = \tilde{\tilde{r}}_i \otimes \left(\tilde{\tilde{r}}_1 \oplus \tilde{\tilde{r}}_2 \oplus \dots. \oplus \tilde{\tilde{r}}_n \right)^{-1} \quad (2.38)$$

$\tilde{\tilde{w}}_i$ est défini comme un poids flou de critère i et $\tilde{\tilde{w}}_i = (l_{\tilde{\tilde{w}}_i}, m_{\tilde{\tilde{w}}_i}, u_{\tilde{\tilde{w}}_i})$, $l_{\tilde{\tilde{w}}_i}, m_{\tilde{\tilde{w}}_i}, u_{\tilde{\tilde{w}}_i}$ représentent respectivement la valeur inférieure, médiane et supérieure des poids flous du critère i.

TABLEAU 2.3- Définition et intervalle des échelles floues de type 2 des variables linguistiques (Kahraman et al., 2014).

variables linguistiques	Intervalles triangulaires de type 2
Absolument fort	(7.5, 9, 10.5; 1) (8.5, 9, 9.5; 0.9)
Très fort	(5.5, 7, 8.5; 1) (6.5, 7, 7.5; 0.9)
Assez fort	(3.5, 5, 6.5; 1) (4.5, 5, 5.5; 0.9)
Légèrement fort	(1.5, 3, 4.5; 1) (2.5, 3, 3.5; 0.9)
Exactement égal	(1, 1, 1; 1) (1, 1, 1; 1)
Si le facteur i se voit attribuer l'une des variables linguistiques ci-dessus par rapport au facteur j, alors j a la valeur réciproque par rapport à i.	Réciproques de ci-dessus

(4) Nous ajustons la valeur de la meilleure performance non floue (BNP) de la méthode centre de l'aire pour défuzzifier et classons les ensembles flous de type 2. Dans notre approche, nous obtenons d'abord des valeurs défuzzifiés puis nous classons les ensembles flous par rapport à ces valeurs. Nous proposons l'approche d'ensemble flou triangulaire défuzzifié de type 2 (DTriT) définie par l'équation (2.39):

$$DTriT = \frac{\frac{(u_u - l_u)+(m_u - l_u)}{3} + l_u + \propto\left[\frac{(u_l - l_l)+(m_l - l_l)}{3} + l_l\right]}{2} \quad (2.39)$$

Où α est le degré d'appartenance maximal de la fonction d'appartenance inférieure de l'ensemble flou de type 2 considéré. u_u est la plus grande valeur possible de la fonction d'appartenance supérieure. l_u est la plus petite valeur possible de la fonction d'appartenance supérieure. m_u est la plus grande valeur possible de la fonction d'appartenance supérieure, u_l est la plus grande valeur possible de la fonction d'appartenance inférieure, l_l est la valeur la plus faible possible de la fonction d'appartenance inférieure, m_l est la valeur la plus possible de la fonction d'appartenance inférieure (Kahraman *et al.*, 2014).

2.5.2. Méthodes d'agrégations

Dans la littérature, il existe plusieurs méthodes d'agrégation combinées avec le jugement d'expert, afin d'évaluer la fiabilité des barrières de sécurité. La section suivante présente quelque méthodes d'agrégation les plus utilisées (Yazdi *et al.*, 2018).

2.5.2.1. Méthode de procédure d'agrégation

La méthode de procédure d'agrégation a été utilisée dans plusieurs travaux de recherche. Cette méthode a été combinée avec la méthode multicritère AHP floue dans les travaux de Zarei *et al.*, (2019). La figure 2.10 présente les étapes de la procédure d'agrégation floue.

L'objectif de cette méthode est d'agréger les avis d'experts afin de minimiser les incertitudes de subjectivité (Daas *et al.*, 2023,b-d). La méthode de procedure d'agrégation est détaillée en deux étapes pour le nombre flou trapézoïdal ou triangulaire et pour le nombre flou intuitionniste triangulaire ou trapézoïdal (tableau 2.4) comme suit

:

TABLEAU 2.4 – Echelle des nombres flous intuitionniste triangulaire (Daas *et al.*, 2024, e).

Variables linguistiques	Nombre flou intuitionniste triangulaire
	$\tilde{A}_{TrIFN} = (a_1, a_2, a_3;\ a'_1, a'_2, a'_3)$
Très faible	(0, 0.04, 0.08 ; 0, 0.04, 0.08)
Faible	(0.07, 0.13, 0.19 ; 0.06, 0.13, 0.20)
Relativement faible	(0.17, 0.27, 0.37 ; 0.15, 0.27, 0.39)
Moyenne	(0.35, 0.50, 0.65 ; 0.32, 0.50, 0.68)
Relativement élevé	(0.62, 0.73, 0.82 ; 0.61, 0.73, 0.85)
Elevé	(0.81, 0.87, 0.93 ; 0.79, 0.87, 0.95)
Très élevé	(0.92, 0.96, 1 ; 0.92, 0.96, 1)

(1) Considérons $\tilde{P}_1 = (P_1^L,\ P_1^M,\ P_1^N\ P_1^U)$ et $\tilde{P}_2 = (P_2^L,\ P_2^M,\ P_2^N, P_2^U)$, deux nombres flous trapézoïdal respectivement et proposé par deux experts. Selon le poids de chaque expert, la procédure d'agrégation est obtenue par l'équation (2.40):

$$\tilde{P}_A = \sum_{m=1}^{M} W_m \otimes \tilde{P}_m \tag{2.40}$$

Où $\tilde{P}_m$ est l'opinion de l'expert en termes de nombres flous, $\tilde{P}_A$ est l'agrégation des nombres flous, m est le nombre d'experts et W_m est les poids de l'expert m.

(2) Ensuite, le nombre d'ensembles flous d'agrégation $\tilde{P}_A$ pour l'expert 1 ($\tilde{P}_1$) et l'expert 2 ($\tilde{P}_2$) dans les nombres flous triangulaires est calculé comme suit par l'équation (2.41):

$$\tilde{P}_A = (w_1 \otimes P_1^L + w_2 \otimes P_2^L, w_1 \otimes P_1^M + w_2 \otimes P_2^M,\ w_1 \otimes P_1^N + w_2 \otimes P_2^N,\ w_1 \otimes P_1^U + w_2 \otimes P_2^U) \tag{2.41}$$

Un certain nombre de méthodes de défuzzification sont disponibles dans la littérature de recherche. Dans notre travail, nous avons retenus la méthode de défuzzification du centre de la zone car il est très populaire et a été développée par (Sugeno *et al.*, 1999) selon l'équation (2.42) suivante.

$$X^* = \frac{\int v_i(x) x dx}{v_i(x) dx} \tag{2.42}$$

Où, X^* est la probabilité de défaillance nette de la sortie défuzzifiée, , $v_i(x)$ est la fonction d'appartenance agrégée et x est la variable de sortie.

La défuzzification du nombre flou triangulaire $\tilde{C} = (c_1, c_2, c_3)$ et du nombre flou trapézoïdal $\tilde{C} = (c_1, c_2, c_3, c_4)$ est donnée par les équations (2.43) et (2.44) respectivement (Daas *et al.*, 2023, b-d). La figure 2.11, suivante illustre un exemple numérique afin de comprendre bien l'application de la méthode de procédure d'agrégation.

$$X^* = \frac{1}{3}(c_1 + c_2 + c_3) \tag{2.43}$$

$$X^* = \frac{1}{3} * \frac{(c_4+c_3)^2 - c_4c_3 - (c_1+c_2)^2 + c_1c_2}{c_4+c_3-c_2-c_1} \tag{2.44}$$

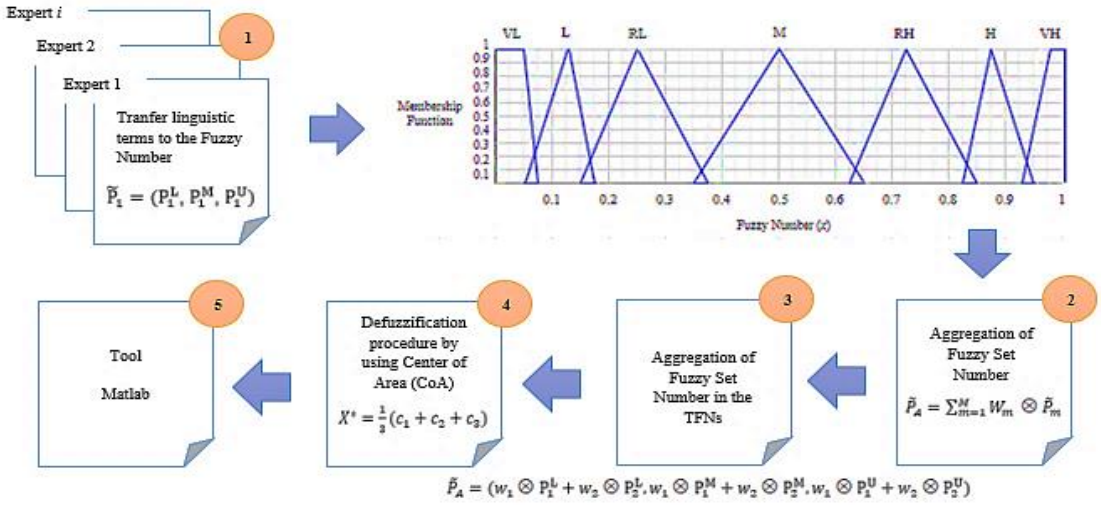


FIGURE 2.10 – Les étapes de la procédure d'agrégation floue.

La défuzzification du nombre flou intuitionniste triangulaire $\tilde{A}_{TrIFN} = (a_1, a_2, a_3;\ a_1', a_2', a_3')$ est donnée par l'équation (2.45), (Daas *et al.*, 2024, e). La figure 2.11, suivante illustre un exemple numérique afin de comprendre bien l'application de la méthode de procédure d'agrégation avec un nombre flou intuitionniste triangulaire.

$$X = \frac{1}{3}\left[\frac{(a_3'-a_1')(a_2-2a_3'-2a_1')+(a_3-a_1)(a_1+a_2+a_3)+3(a_3'^2-a_1'^2)}{a_3'-a_1'+a_3-a_1}\right] \tag{2.45}$$

Où, X est la possibilite de Défaillance nette qui a été converti par la suite en probabilité de défaillance des barriers de sécurité d'urgence.

Afin de facilité les calculs, nous avons utilisé le code de l'agrégation du nombre flou intuitionniste dans le logiciel Matlab (voir Annexe (C)).

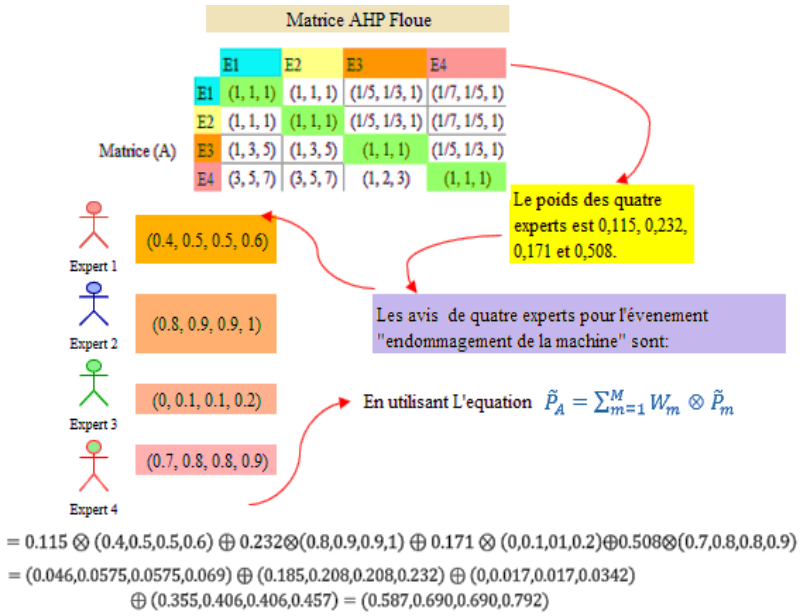


FIGURE 2.11 – Exemple illustrative sur la méthode de procédure d'agrégation.

2.5.2.2. Méthode d'agrégation de similarité

La méthode d'agrégation de similarité (*Similarity aggregation method (SAM)*) a été proposée pour la première fois par Hsu *et al.*, (1996) pour aborder la prise de décision de groupe. Elle a été mise à profit dans plusieurs travaux de recherche (Lee, 1999 ; Lu *et al.*, 2006 ; Zenebe *et al.*, 2009). Elle a été utilisée pour identifier et évaluer l'analyse des défaillances des réservoirs de gaz naturel liquéfié (GNL) des systèmes d'atterrissage des avions (Kim *et al.*, 2005). Liu *et al.*, (2019) ont développé une nouvelle méthodologie pour l'évaluation des risques de défaillance d'une barrière de sécurité basée sur l'intégration du réseau bayésien et de la méthode d'agrégation de similarité en utilisant des nombre flous trapézoïdaux intuitionnistes (TpIFN-SAM). Yin *et al.*, (2020) ont proposé un cadre pour l'évaluation de la sécurité des réservoirs de stockage de gaz naturel à l'aide d'une approche d'analyse par arbre de défaillance flou basée sur la méthode d'agrégation de similarité. Guo *et al.*, (2021) ont présenté une nouvelle méthodologie de réseau bayésien flou basée sur une méthode d'agrégation de similarité améliorée pour l'évaluation des risques d'accident des réservoirs de stockage. Kumar *et al.*, (2022) ont proposé une analyse par arbre de défaillances flou du risque de rejet de chlore gazeux à l'aide de la méthode d'agrégation de similarité basée sur l'intervalle Alfa-coupes.

Le tableau 2.4 présente sept termes linguistiques. Signalons qu'un excès de termes linguistiques peut confondre les experts dans la réponse (Rajakarunakaran *et al.*, 2015). L'échelle linguistique ci-dessous est utilisée pour déterminer les jugements qualitatifs des experts en ce qui concerne les défaillances avec une probabilité de défaillance inconnue. Ensuite, les expressions linguistiques sont transformées en nombres flous à l'aide d'un système d'approximation numérique. La méthode d'agrégation de similarité est détaillée en quatre étapes comme suit :

TABLEAU 2.5 – Fonctions d'appartenance d'un nombre flou trapézoïdal.

Variables linguistiques	Nombre flou trapézoïdal (P^L, P^M, P^N, P^U)
Très faible	(0, 0.03, 0.05, 0.08)
faible	(0.07, 0.10, 0.15, 0.19)
Relativement faible	(0.17, 0.20, 0.30, 0.37)
Moyenne	(0.35, 0.45, 0.55, 0.65)
Relativement élevée	(0.62, 0.70, 0.75, 0.82)
Elevée	(0.81, 0.85, 0.90, 0.93)
Très élevée	(0.92, 0.94, 0.96, 1.00)

— ***Etape 1***. Calculer la similarité des opinions des experts et créer une matrice de similarité. Le dégrée de similarité $S(\tilde{R}_i, \tilde{R}_j)$ entre le *i*ème expert et le *j*éme expert est calculé par l'équation (2.45) proposée par (Zwick *et al.*, 1987). Plus la valeur est élevée, plus la similarité des opinions est forte.

$$S(\tilde{R}_i, \tilde{R}_j) = \frac{\int x\left(min\left\{\tilde{R}_i^{\mu}(x), \tilde{R}_j^{\mu}(x)\right\}\right)dx}{\int x\left(max\left\{\tilde{R}_i^{\mu}(x), \tilde{R}_j^{\mu}(x)\right\}\right)dx} \tag{2.46}$$

Où $\tilde{R}_i$ désigne un nombre flou triangulaire ou trapézoïdal pour représenter l'opinion floue du *i*ème expert, $\tilde{R}_i^{\mu}(x)$ désigne la fonction d'appartenance de $\tilde{R}_i$. Lors de l'obtention de la similarité des opinions de deux experts, une matrice de similarité peut être construite à l'aide de l'équation (2.47).

$$SM = \begin{bmatrix} 1 & S_{12} & \dots S_{ij} \dots & S_{1n} \\ S_{21} & 1 & \dots S_{2j} \dots & \tilde{\tilde{a}}_{2n} \\ \dots. & & \dots. & \dots. \\ S_{n1} & S_{n2} & \dots S_{nj} \dots & 1 \end{bmatrix} \tag{2.47}$$

Où si $i \neq j$, alors $S_{ij} = S(\tilde{R}_i, \tilde{R}_j)$; si $i = j$, $S_{ij} = 1$.

— ***Etape 2***. Calculer la similarité relative de chaque expert. Après avoir obtenu la matrice d'opinion, le degré de similarité moyen $S(E_i)$ de l'opinion de chaque expert peut être calculé par l'équation (2.48), puis la similarité relative de chaque expert RSD_i peut être obtenue par l'équation (2.49).

$$S(E_i) = \frac{1}{n-1}\sum_{\substack{j=1 \\ j\neq i}}^{n} S_{ij} \tag{2.48}$$

$$RSD_i = \frac{S(E_i)}{\sum_{i=1}^{n} S(E_i)} \tag{2.49}$$

Où E_i $(i = 1,2, \dots, n)$ représente le *i*ème experts.

— ***Etape 3***. Calculer le coefficient de degré de consensus de chaque expert et agréger les opinions floues. Etant donné que l'importance relative des experts est différente,

chaque expert a un coefficient de pondération w_i selon le tableau 2.5. Le coefficient de degré de consensus CDC_i du *i*ème expert peut être défini par l'équation (2.50) :

$$CDC_i = \beta . w_i + (1 - \beta) . RSD_i \tag{2.50}$$

Où CDC_i est une mesure d'évaluation de la valeur relative de l'opinion de chaque expert. $\beta (0 \leq \beta \leq 1)$ est un facteur de relation qui reflète l'importance de w_i sur RSD_i. Lorsque $\beta = 0$, aucune importance ne lui a été accordée par les experts et donc un groupe homogène d'experts est employé. A l'inverse, lorsque $\beta = 1$, le degré de consensus d'un expert est égal à son poids d'importance. Lorsque tous les CDC_i sont déterminés, le résultat d'agrégation $\tilde{R}$ peut être défini par l'équation (2.51) :

$$\tilde{R} = \sum_{i=1}^{n} (CDC_i \otimes \tilde{R}_i) \tag{2.51}$$

TABLEAU 2.6 – Coefficients de pondération des experts (Renjith *et al.*, 2010).

Caractéristiques	Niveau	Score	Caractéristiques	Niveau	Score
Expérience	Plus de 30 ans	4	Niveau professionnel	Complètement pertinent	4
	21-30 ans	3		Fondamentalement pertinent	3
	11-20 ans	2		Moins pertinent	2
	Moins de 10 ans	1		Complètement sans importance	1
Education	Ph.D	4	Catégorie professionnel	Directeur	4
	Master	3		Cadre	3
	Premier cycle	2		Ingénieur	2
	En dessous du premier cycle	1		Autres	1

— ***Etape 4***. L'étape suivante consiste à convertir la fonction d'appartenance de $\tilde{R}$ en une valeur nette par une certaine méthode de défuzzification. Dans ce manuscrit, nous avons utilisé la méthode du centroïde qui renvoie le centre de gravité de la zone sous la fonction d'appartenance de $\tilde{R}$ comme indiqué dans l'équation (2.52):

$$P^* = \frac{\int \mu_{\tilde{R}}(x) x dx}{\int \mu_{\tilde{R}}(x) dx} \tag{2.52}$$

Où P* est la probabilité finale estimée sur la base des opinions d'experts, $\mu_{\tilde{R}}(x)$ est la fonction d'appartenance de $\tilde{R}$.

Par conséquent, la défuzzification du nombre flou triangulaire $\tilde{C} = (c_1, c_2, c_3)$ et du nombre flou trapézoïdal $\tilde{C} = (c_1, c_2, c_3, c_4)$ est donnée par les équations (2.43) et (2.44) respectivement.

La figure 2.12 représente un exemple numérique illustratif de la méthode d'agrégation de similarité.

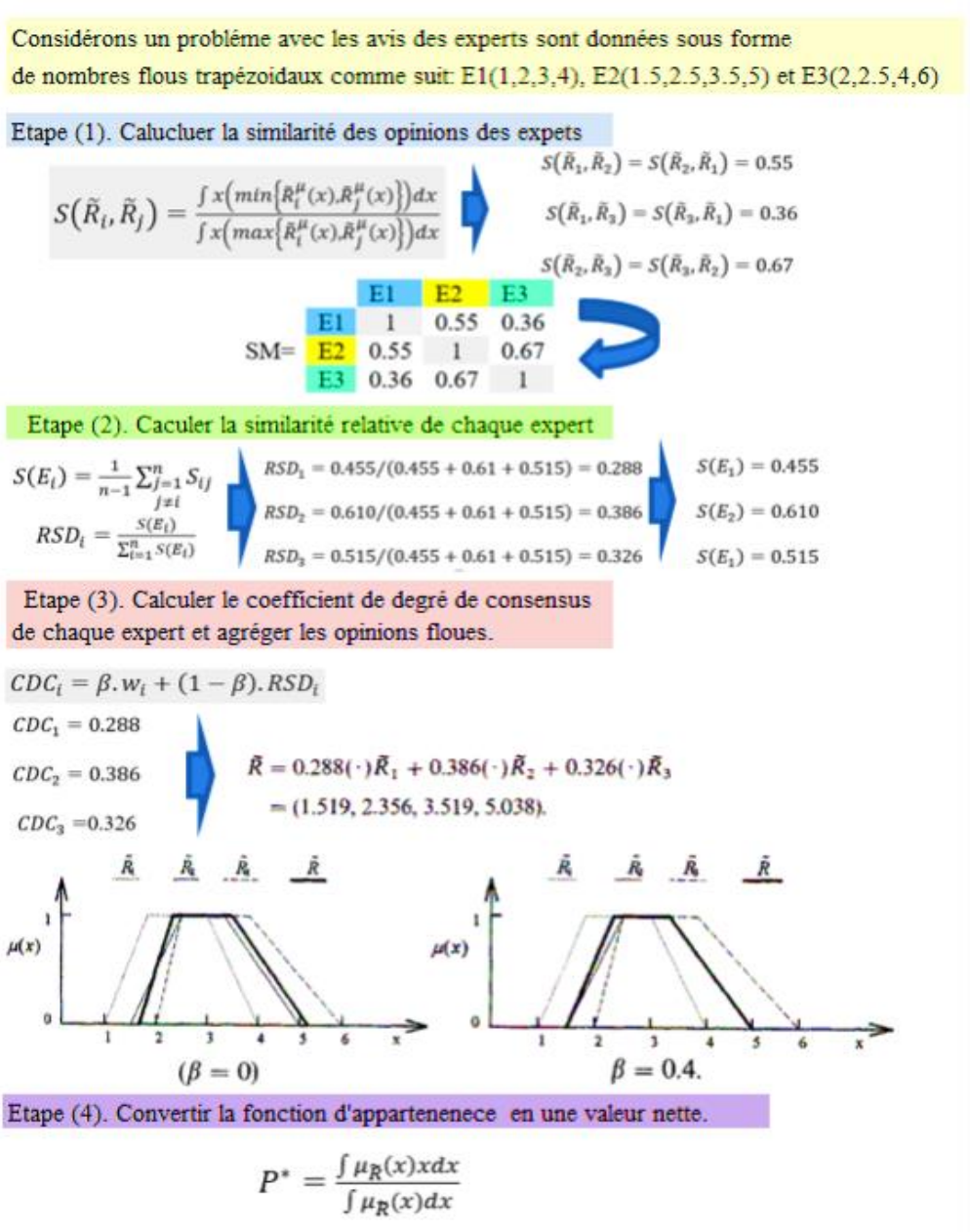


FIGURE 2.12 – Exemple illustrative pour la méthode d'agrégation de similarité.

2.6. Calcul de la probabilité de défaillance floue

Après la défuzzification du nombre trapézoïdal ou triangulaire flou, il est nécessaire de calculer la probabilité de défaillance floue des barrières de sécurité d'urgence. La formule proposée par Onisawa (1988) est largement utilisée dans de nombreuses recherches. Dans ce contexte, Jianxing *et al.*, (2019) proposent une formule Onisawa modifiée. Dans notre travail, nous avons utilisé la formule d'Onisawa classique et amélioré afin de calculer la probabilité de défaillance et probabilité de défaillance floue des barrières de sécurité d'urgence pour le nombre trapézoïdal et triangulaire (Daas *et al.*, 2023, b-d-e). A ce titre, ces deux grandeurs sont calculées comme suit,

- La probabilité de défaillance de chaque barrière de sécurité est calculée par les équations (2.53) et (2.54):

$$FP = \begin{cases} {}^{1}/_{10^{K}}, & \text{CFP} \neq 0 \\ 0, & \text{CFP} = 0 \end{cases} \tag{2.53}$$

$$K = \left[\left(\frac{1}{CFP} - 1\right)\right]^{1/3} \times 2.301 \tag{2.54}$$

Où k est une variable intermédiaire ne dépendant que de la probabilité de défaillance nette (CFP).

- La probabilité de défaillance floue de chaque barrière de sécurité est calculée par les équations (2.55) et (2.56):

$$FFP = {}^{1}/_{10^{k}} \tag{2.55}$$

$$K = -(FPS \times 10 - 12) \times 0.5 \tag{2.56}$$

Où FFP est la probabilité de défaillance floue, k est une variable intermédiaire ne dépendant que du score de possibilité floue FPS.

La probabilité de défaillance floue (FPS) est calculé après la défuzzification du nombre triangulaire flou $\tilde{C} = (c_1, c_2, c_3)$ et du nombre trapézoïdal flou $\tilde{C} = (c_1, c_2, c_3, c_4)$ est donnée par les équations (2.43) et (2.44) respectivement.

Une fois que la probabilité de défaillance floue des barrières de sécurité est calculée, il est nécessaire d'évaluer la probabilité d'occurrence des conséquences d'urgence lié à un scénario d'accident donnée.

2.7. Calcul de la fréquence d'occurrence des conséquences d'urgence

Notre contribution est de développer une analyse par arbre des événements d'urgence (*EETA : emergency event tree analysis*) basée sur l'analyse par arbre des événements classique (AdE ou ETA) crée à partir des résultats de l'étude HAZOP. L'*EETA* est utilisé pour les situations d'urgence du scénario d'accident grave, comme le montre la Figure 2.13 ci-dessous. Il décrit les conséquences d'urgence de l'accident lorsque l'événement initial est un scénario d'accident majeur. Son exploitation quantitative permet d'estimer la probabilité des conséquences possibles de l'accident en fonction des probabilités de défaillance floue de la barrière de sécurité et de la fréquence d'occurrence. Les fréquences des conséquences de l'accident doivent être calculées en estimant la probabilité de défaillance des barrières d'urgence de sécurité (Daas *et al.*, 2023-d-e). Dans cette étude, nous avons développé des modèles d'équations permettant de calculer la fréquence d'occurrence des conséquences d'urgence.

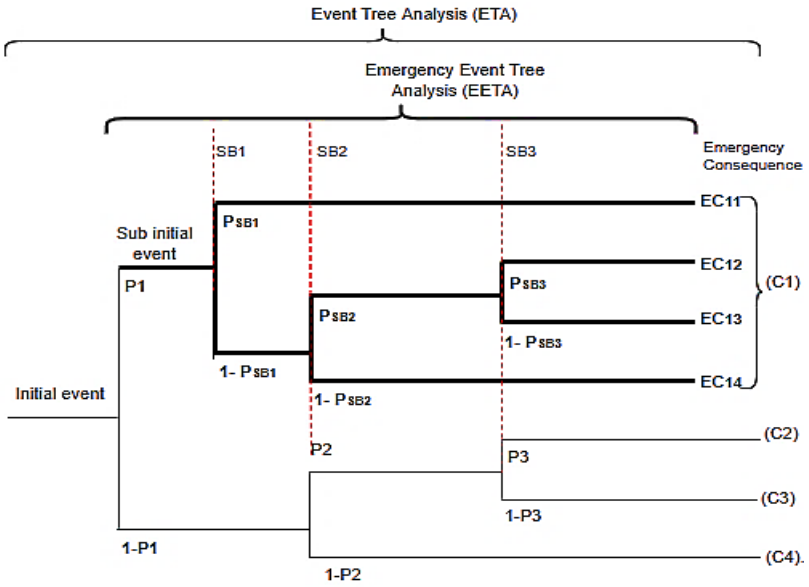


FIGURE 2.13 – Extension d'un arbre d'évènement (Daas *et al.*, 2023-b-d-e).

$$\begin{cases} F(EC_{11}) = P \times P_1 \times P_{SB_1} \\ F(EC_{12}) = P \times P_1 \times (1 - P_{SB_1}) \times P_{SB2} \times P_{SB3} \\ F(EC_{13}) = P \times P_1 \times (1 - P_{SB_1}) \times P_{SB2} \times (1 - P_{SB3}) \\ F(EC_{1i}) = P \times P_1 \times (1 - P_{SB_1}) \times (1 - P_{SB2}) \end{cases} \quad (2.57)$$

Où $F(EC_{1i})$ est la fréquence d'occurrence de conséquence d'urgence et $i = 1, 2, \ldots, n$, n étant le nombre total des conséquences d'urgences.

La valeur de la fréquence d'occurrence des conséquences C_1 est la somme de la fréquence d'occurrence des conséquences d'urgence sont données par les équations (2.58) et (2.59) suivantes:

$$\begin{cases} F(C_1) = P \times \sum_{i=1}^{n} F(EC_{1i}) \\ F(C_2) = P \times (1 - P_1) \times P_2 \times P_3 \\ F(C_3) = P \times (1 - P_1) \times P_2 \times (1 - P_3) \\ F(C_4) = P \times (1 - P_1) \times (1 - P_2) \end{cases}, \; i = 1, 2, 3, \ldots\ldots, n \tag{2.58}$$

$$\sum_{i=1}^{n} F(EC_{1i}) = F(EC_{11}) + F(EC_{12}) + \cdots + F(EC_{1n}), i = 1, 2, 3, \ldots\ldots, n \tag{2.59}$$

Où ;$F(C_1)$, $F(C_2)$, $F(C_3)$, $F(C_4)$ sont la fréquence d'occurrence des différents scenarios d'accident.

2.8. Conclusion

L'objectif de ce chapitre était de considérer l'incertitude attachée aux avis d'experts lors de l'évaluation des probabilités de défaillance des barrières de sécurité. Rappelons que cette évaluation repose sur un jugement d'expert en raison du manque de données. A ce titre, nous avons présenté de différentes techniques basées sur la théorie des ensembles floues permettant la considération des incertitudes, d'une part, et des techniques d'agrégation, d'autre part. A cet effet, nous avons retenu la théorie des ensembles flous de type 2 avec la méthode multicritère AHP afin d'obtenir des pondérations des avis d'experts. Pour l'agrégation des avis des experts, nous avons considéré la méthode de procédure d'agrégation intégrée avec la théorie des ensembles afin d'agréger et défuzzifier les nombres triangulaire et trapézoïdal flous. Finalement, l'estimation des fréquences d'occurrences des scénarios d'accidents est réalisée en utilisant la méthode de l'arbre des événements (Daas *et al.*, 2023, b-d-e).

Chapitre 3

Optimisation de la fiabilité des barrières de sécurité d'urgence

3.1. Introduction

L'optimisation de la fiabilité des barrières de sécurité consiste à identifier les paramètres de performance optimale qui permettent la réduction des fréquences et/ou l'atténuation des conséquences des scénarios accidentels avec un coût raisonnable. Dans la littérature, plusieurs problématiques de l'optimisation de la fiabilité des barrières de sécurité sont discutées à savoir l'optimisation de l'architecture du système pour une fiabilité optimale, optimisation des coûts-bénéfices des barrières de sécurité et l'optimisation de l'efficacité de la maintenance des équipements. A titre d'exemple, Di Maio *et al.,* (2023) ont proposé l'optimisation multi-objectifs robuste des paramètres de performance des barrières de sécurité pour l'évaluation et la gestion des risques des scénarios du risque naturel et technologique (NaTech). Aussi, Yuan *et al.,* (2023) ont proposé une gestion dynamique des barrières de sécurité en fonction des risques pour une optimisation rentable des barrières basée sur des données provenant de plusieurs sources.

Dans ce contexte, ce chapitre vise à fournir un cadre supplémentaire afin d'optimiser la fiabilité des barrières de sécurité. A cet effet, il est nécessaire tout d'abord de hiérarchiser l'impact des facteurs du risque liés à la perturbation d'une barrière de sécurité sur le personnel, l'environnement, publique et la production. Par la suite, nous évaluons la disponibilité des barrières de sécurité d'urgence en utilisant l'analyse par arbre de défaillance (AdD) et l'*opérateur de la moyenne pondérée ordonné incertain dépendant amélioré* (*DUOWA*). Enfin, nous identifions les équipements critiques en termes d'indisponibilité, et un ensemble des actions correctives sont proposées afin d'optimiser la fiabilité. La détermination de l'action corrective la plus efficace pour améliorer la fiabilité de la barrière de sécurité est effectuée à l'aide de la théorie du raisonnement probant.

3.2. Description sommaire de la méthodologie proposée

Dans ce chapitre, une méthodologie de recherche est proposée afin d'optimiser (au sens de l'amélioration) la fiabilité des barrières de sécurité. L'ensemble de la méthodologie est présenté en sept étapes et est illustré à la figure 3.1 (DAAS *et al.*, 2023, a).. La première étape se concentre sur la hiérarchisation des impacts de perturbation des barrières de sécurité sur le personnel, l'environnement, le public et sur la production. Cette hiérarchisation est basée sur la méthode AMPEC (*Analyse des Modes de Perturbations, de leurs Effets et de leurs Criticité*) et sur la méthode AHP floue (DAAS *et al.*, 2023, c).. La deuxième étape consiste à élaborer l'arbre de défaillance de la barrière de sécurité. La troisième étape consiste à recueillir des avis d'experts basés sur des termes linguistiques pour évaluer chaque événement de base. La quatrième étape vise à estimer la probabilité de défaillance de chaque événement de base à l'aide d'un opérateur de moyenne pondéré ordonné dépendant amélioré. Ici, cette étape se compose de sept sous-étapes suivantes :

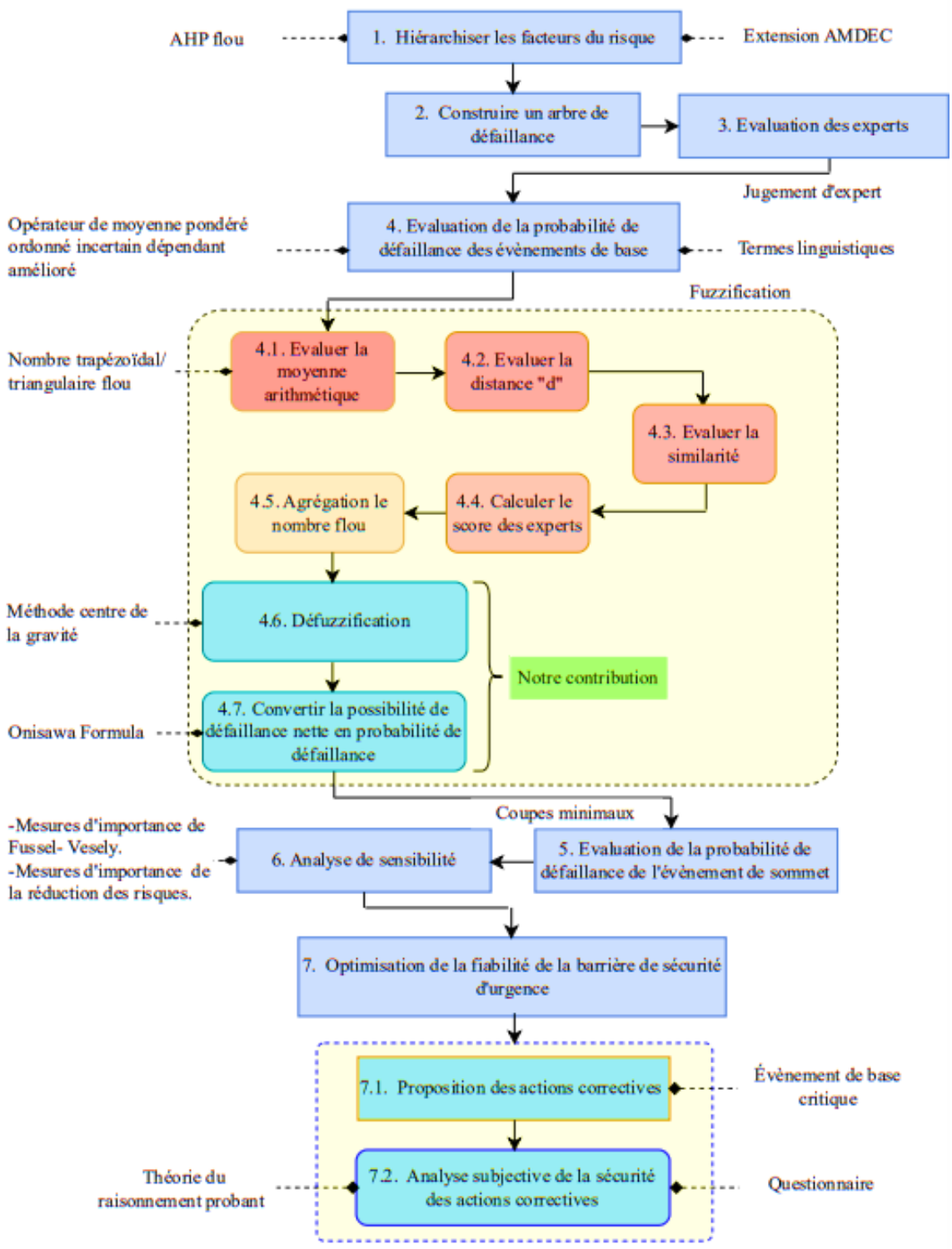


FIGURE 3.1 – La méthodologie proposée pour l'optimisation de la fiabilité des barrières de sécurité (Daas *et al.*, 2023, a-d).

- Calculer la moyenne arithmétique en convertissant les termes linguistiques en un nombre flou triangulaire.
- Evaluer la distance entre la moyenne arithmétique et l'opinion d'expert de chaque événement de base.
- Calculer la similarité entre la moyenne arithmétique et l'estimation d'expert pour chaque événement de base.
- Calculer le poids final des experts.
- La procédure d'agrégation finale est basée sur l'opérateur de moyenne pondérée ordonnée incertaine dépendante.
- La principale contribution est l'amélioration de l'opérateur de moyenne pondérée ordonnée incertaine dépendante en utilisant le centre de l'aire pour la défuzzification des nombres flous.
- Convertir la possibilité de défaillance nette en probabilité de défaillance à l'aide de la formule d'Onisawa.

La cinquième étape consiste à calculer la probabilité de défaillance de l'événement sommet. Pour ce faire, nous avons mis à profit le logiciel GRIF (GRIF, 2022). La sixième étape consiste à analyser l'importance des événements de base et des ensembles de coupes minimales (Daas *et al.*, 2023, a). La dernière étape consiste à optimiser la fiabilité des barrières de sécurité basée sur l'évaluation subjective des actions correctives proposées. Des descriptions détaillées de ces étapes sont fournies dans les paragraphes suivants.

3.3. Hiérarchisation des facteurs de risque

Dans ce travail, nous avons proposé ne méthodologie qui contient deux étapes essentielles afin d'hiérarchiser les facteurs de risques, tel que présenté dans la figure 3.2. La première étape vise à évaluer le mode de perturbation des barrières de sécurité d'urgence. Cette étape nécessite des informations sur chaque mode de perturbation en termes de fréquence, de probabilité de non-détection et d'impact des conséquences possibles. Ici, cette étape se compose de trois sous étapes (Daas *et al.*, 2023, c).

- Identification des modes de perturbation en utilisant le mode de perturbation, les effets et l'analyse de la criticité.
- Estimation du nombre de priorité du risque (*NPR*) pour chaque mode de perturbation.
- Détermination des actions correctives possibles des modes de perturbation critique.

Une fois que le *NPR* est calculé, la deuxième étape consiste à utiliser la méthode AHP floue de type Buckley (Buckley, 1985) afin de sélectionner des facteurs de risque pour contrôler l'impact des modes de perturbation dont les *RPN* dépassent un seuil donnée. A cet effet, le mode de perturbation le plus critique nécessite un plan d'action (ou des actions correctives). Cette sélection est faite en priorisant l'efficacité de chaque action corrective en ce qui concerne l'impact de la perturbation des barrières de sécurité d'urgence sur les quatre facteurs de risque : personnel, environnement, population et production. Une description détaillée de ces étapes est fournie dans les paragraphes suivants.

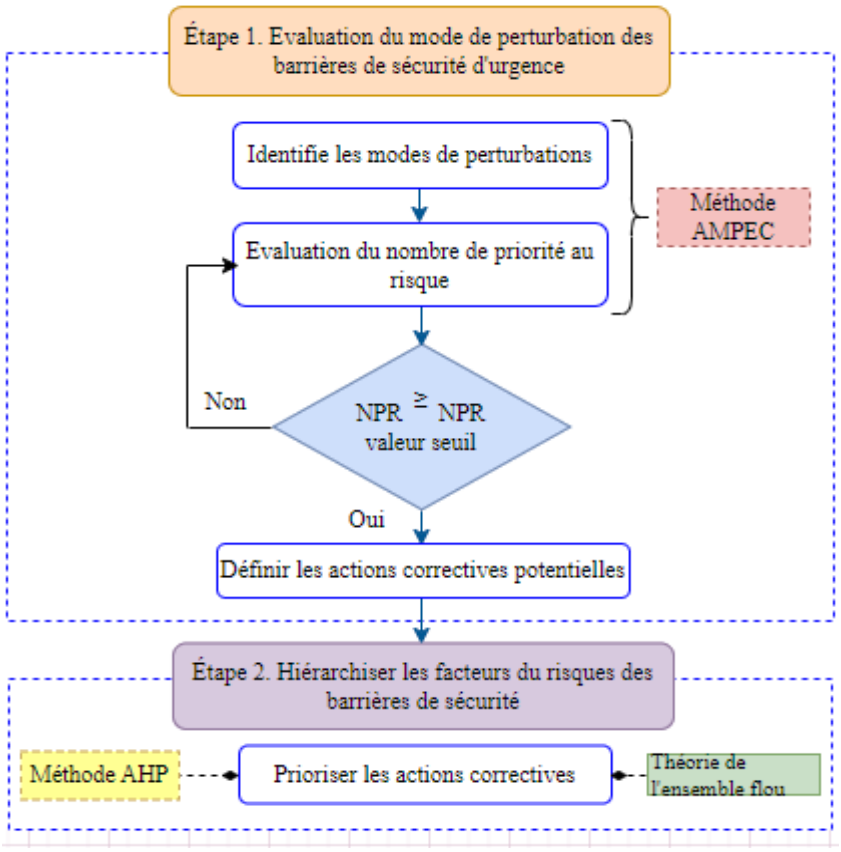


FIGURE 3.2 – Démarche de la hiérarchisation des facteurs du risque (Daas *et al.*, 2023, c).

3.3.1. Evaluation des modes de perturbations par la méthode AMPEC

L'analyse des modes de défaillance, de leurs effets et de leur criticité (AMDEC) est une méthode typique d'évaluation et de prévention des risques (Efe *et al.*, 2019). AMDEC est mise en œuvre à l'aide de la norme (ICE 60812, 2018), qui fournit des conseils sur la façon dont l'AMDE peut être mise en œuvre pour atteindre divers objectifs de fiabilité des systèmes (Tacnet, 2009 ; Karagiannis, 2010). Généralement, elle nécessite de différentes évaluations fournies par différents experts pour déterminer les NPR. Toutefois, comme nous l'avons déjà signalé, des incertitudes peuvent entacher ces évaluations. De plus, dans certains cas, les experts donnent des appréciations différentes voire contradictoires. Afin de traiter la subjectivité inhérente aux experts, plusieurs techniques ont été intégrées à l'AMDEC, telles que la logique floue (Ivančan *et al.*, 2023 ; Li et al., 2023), la théorie des ensembles flous, (Ghasemi *et al.*, 2022) les méthodes multicritère floues, la théorie de l'évidence (Tang *et al.*, 2023), etc.

Dans notre travail, nous avons adopté une autre extension de la méthode AMDEC nommé « analyse des modes de perturbation, de leurs effets et de leur criticité (AMPEC) » qui a été proposée par Aitouche *et al.*, (2011). La méthode AMPEC est caractérisée par trois paramètres. La probabilité d'occurrence F, impact des perturbations I et la non détection D

(Liu *et al.*, 2014 ; Daas *et al.*, 2023, c). Cette méthode comporte plusieurs étapes comme présenté dans ce qui suit :

- Analyse fonctionnelle du système en question.
- Identification des différents modes de perturbations.
- Evaluations de chaque mode de perturbation à l'aide des paramètres de probabilité d'occurrence F, d'impact des défaillances I et de non détection D (voir tableaux 3.1, 3.2 et 3.3).
- Evaluation des *NPR* pour les modes de perturbations. Sur la base de l'expérience des experts, différentes classes pour le NPR sont proposées, comme indique le tableau 3.4. IL est calculé selon l'équation (3.1) suivante :

$$NPR = F \times I \times D \tag{3.1}$$

Où F est la probabilité d'occurrence, I est l'impact des perturbations et D est la non détection.

- Une fois que les modes de perturbations sont évalués, des actions correctives sont proposées pour les modes de perturbations jugées critiques selon le tableau 3.4.

TABLEAU 3.1 – Classification de la probabilité d'occurrence des modes de perturbations.

Niveau	Description qualitative
1	Perturbation très improbable
2	Perturbation peu probable
3	Perturbation probable
4	Perturbation très probable

TABLEAU 3.2 – Classification de l'impact des modes de perturbations.

Niveau	Description qualitative
1	Impact mineur
2	Impact moyenne
3	Impact critique
4	Impact catastrophique

TABLEAU 3.3 – Classification de la détection des modes de perturbations .

Niveau	Qualitative description
1	Détection évidente : signe fort avant détection d'une perturbation et dispositif de détection automatique (alarme).
2	Détection possible : un événement facile à détecter, mais nécessite une réaction particulière.
3	Détection improbable : un événement difficilement détectable et nécessitant une réaction ou des moyens complexes (démontage, etc.).
4	Détection impossible : signaux très faibles avant la survenance d'un événement.

TABLEAU 3.4 – Classement du nombre de priorité du risque (*NPR*).

Classes du nombre de priorité des risques	Description qualitative
$1 \leq NPR \leq 12$	Négligeable
$12 \leq NPR \leq 16$	Moyenne
$16 \leq NPR \leq 20$	Elevée
$20 \leq NPR \leq 80$	Très élevée

3.3.2. Hiérarchisation des facteurs de risque par la méthode AHP floue

L'incapacité de la méthode AHP à gérer l'imprécision et la subjectivité dans le processus de comparaison par paires a été améliorée dans l'AHP floue. Au lieu d'une valeur nette, la méthode AHP floue utilise une plage de valeurs pour incorporer l'incertitude du décideur (Kuswandari, 2004). Van Laarhoven *et al.*, (1983) proposent un algorithme qui est l'extension directe de la méthode AHP de Saaty (Saaty, 1985, 2004). Buckley a également proposé une extension floue de la méthode AHP de Saaty pour incorporer des rapports de comparaison a_{ij} (Buckley, 1985 ; Daas *et al.*, 2023,c). Par ailleurs, Chang, (1992), a proposé une autre extension floue de la méthode AHP.

Dans notre travail, nous retenons la méthode AHP floue proposée par (Buckley, 1985), illustrée dans les étapes suivantes.

- ***Etape 1***. Consulter le décideur et obtenir la matrice de comparaison (A) composée de nombre triangulaire flous $\tilde{t}_{ij} = (a_{ij}, b_{ij}, c_{ij})$, selon le tableau (3.5) suivant.

TABLEAU 3.5 – Interprétation des entités dans une matrice de comparaison par paires.

Valeurs de a_{ij}	Interprétation
1	Les objectifs i et j ont une importance égale
3	L'objectif i est faiblement plus important que l'objectif j.
5	L'expérience et le jugement indiquent que l'objectif i est nettement plus important que l'objectif j.
7	L'objectif i est très fortement ou manifestement plus important que l'objectif j.
9	L'objectif i est absolument plus important que l'objectif j.
2, 4, 6, 8	Valeurs intermédiaires.

— ***Etape 2***. Les poids flous w_i peuvent être calculés comme suit. La moyenne géométrique $(\tilde{z}_i)$ pour chaque ligne de la matrice (A) est déterminée selon l'équation (3.2). Le poids flou w_i est donné par l'équation (3.3):

$$\tilde{z}_i = \left[\prod_{j=1}^{n} \tilde{t}_{ij}\right] \tag{3.2}$$

$$w_i = \tilde{z}_i \oplus \left[\sum_{j=1}^{n} \tilde{z}_j\right]^{-1} \tag{3.3}$$

Par ailleurs, les moyennes géométriques des valeurs floues ont ensuite calculés selon les équations (3.4) et (3.5).

$$a_i = \left[\prod_{j=1}^{n} \tilde{t}_{ij}\right]^{1/n} \tag{3.4}$$

$$a = \sum_{i=1}^{m} a_i \tag{3.5}$$

De même, on peut définir b_i et b, c_i et c et a_i et a. Le poids flou w_i est déterminé selon l'équation (3.6) suivante :

$$w_i = \left(\frac{a_i}{a}, \frac{b_i}{b}, \frac{c_i}{c}\right), \forall\, i \tag{3.6}$$

— ***Etape 3***. La procédure de défuzzification consiste à localiser la meilleure valeur de performance non floue (Best Non- fuzzy Performance value (BNP)) en utilisant la méthode COA (Center Of Area : centre de la surface ou de l'aire). La valeur BNP du nombre flou $\tilde{R}_i$ peut être déterminée par l'équation (3.7) suivante :

$$BNP_i = \frac{[(c_i w_i - a_i w_i) + (b_i w_i - a_i w_i)]}{3} + a_i w_i \tag{3.7}$$

3.4. Evaluation de la disponibilité des barrières de sécurité d'urgence à l'aide des AdD

3.4.1. Revue de littérature

Afin d'assurer une très haute fiabilité des barrières de sécurité, il existe une grande variété de méthodologies de fiabilité et d'analyse des risques avec des propriétés à la fois qualitatives et quantitatives, comme détaillé par Khan *et al.,* (2015). Dans ce contexte, le choix d'une méthode d'attribution de la fiabilité des barrières de sécurité n'est pas toujours facile ni simple, car il dépend de plusieurs facteurs. Certains facteurs sont directement liés aux caractéristiques du système analysé, comme le niveau de complexité et la configuration de fiabilité (Forcina *et al.,* 2020). D'autre part, d'autres aspects représentent des contraintes telles que le budget et le temps d'essai (Liaw *et al,* 2011). (Di Bona *et al.,* 2016) ont proposé une nouvelle approche basée sur la méthode factorielle intégrée. Les valeurs sont ajustées en fonction de l'importance de chaque facteur à l'aide de la méthode multicritère AHP. Chaque unité du système est le résultat d'un modèle dynamique qui combine les avantages des méthodes d'allocation et des techniques d'aide à la décision multicritères. (Yadav *et al.,* 2014) examinent les limites des approches existantes et proposent une échelle d'importance modifiée pour l'allocation des sous-systèmes dans le but d'améliorer la fiabilité du système. Une mesure de gravité modifiée est conçue pour tenir compte des phénomènes non linéaires dans la gravité des défauts et le taux de défaillance afin d'identifier le potentiel d'amélioration. Les objectifs de réduction du taux de défaillance sont fixés proportionnellement au potentiel d'amélioration. Chen *et al.,* (2019) ont développé un nouveau cadre graphique dynamique pour attribuer la fiabilité et évaluer les barrières de sécurité en tenant compte de l'effet domino.

Diverses méthodes ont été développées pour évaluer la fiabilité des barrières de sécurité. L'analyse par arbre des défaillances (AdD) est l'un des outils d'évaluation probabiliste des risques (PRA) les plus importants et qui est largement utilisé dans diverses applications industrielles (Zhou *et al.,* 2017 ; Yazdi *et al.,* 2018). A ce titre, veuillez consulter l'annexe (D) pour une étude bibliométrique détaillée sur l'usage des AdD.

Plusieurs chercheurs ont appliqué avec succès la méthode AdD flou dans divers domaines afin d'évaluer la fiabilité ou la disponibilité des barrières de sécurité (Omidvari *et al.,* 2014; Lavasani *et al.,* 2015; Ramzali *et al.,* 2015). Par exemple, Badida *et al.,* (2019) ont proposé une nouvelle méthode hybride pour estimer la probabilité de défaillance d'un oléoduc et d'un gazoduc en incorporant la théorie des ensembles flous dans l'AdD. Cheliyan *et al.,* (2018) et Halloul *et al.,* (2019) ont développé une analyse par AdD flou pour évaluer le risque de stockage de pétrole dans les réservoirs. Toujours dans ce même contexte, Kabir *et al.,* (2023) ont utilisé la théorie des ensembles flous pour réduire l'erreur causée par l'écart important des jugements d'experts. Kumar *et al.,* (2020) ont proposé une approche pour intégrer les opinions de différents experts et l'AdD flou intuitionniste pour évaluer les données qualitatives sur les défaillances des composants du système. En outre Rajakarunakaran *et al.,* (2015) ont présenté une méthodologie basée sur l'AdD flou combinée à une élicitation d'experts pour estimer la probabilité de défaillance des stations-

service. De plus, Yin *et al.*, (2020) ont conduit une analyse AdD flou basée sur la méthode d'agrégation de similarité pour traiter les divergences complexes d'opinions de différents experts et pour obtenir les probabilités d'événements de base.

3.4.2. Construction et exploitation des arbres des défaillances

La disponibilité $A(t)$ du système est la probabilité qu'il exécute les fonctions requises dans des conditions données et à un moment donné. Dans le cas d'une entité non réparable, la disponibilité et la fiabilité se confondent ($A(t) \sim R(t)$ dans le cas contraire, $A(t) \geq R(t)$). L'indisponibilité $U(t)$ est le complément à 1 de la disponibilité et est définie selon les équations (3.8) et (3.9) suivantes :

$$U(t) = 1 - A(t) \tag{3.8}$$
$$U(t) = 1 - R(t) \tag{3.9}$$

Où $R(t)$ est la fiabilité du système à temps t.

Une analyse AdD permet l'élaboration d'un modèle graphique pour décrire les combinaisons logiques d'événements qui conduisent à la défaillance d'un système donné (événement sommet : TOP event), via des portes logiques telles que les porte ET et OU (voir figure 3.3).

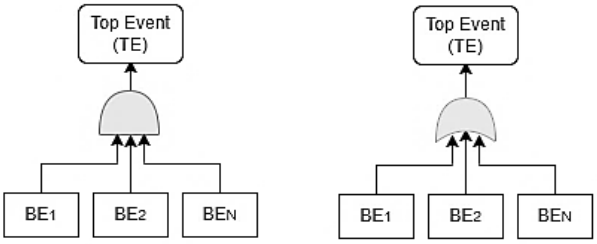


FIGURE 3.3 – Portes logiques « Et » et « Ou » reliant des événements de base.

Si les probabilité $P_i(t)$ des différents événements de base (EB_1 à EB_N) sont connues, la probabilité de l'événement sommet, notée $P(t)$, peut être calculé. Plusieurs algorithmes de calcul sont disponibles à cet effet. L'algorithme le plus efficace à l'heure actuelle et celui basée sur les diagrammes binaires de décision (BDD) (Rauzy, 1993). D'une manière plus simpliste et à titre explicatif, l'équation (3.10) montre le calcul des probabilités liées aux portes ET et OU.

$$P(t) = \begin{cases} \prod_{i=1}^{N} P_i(t), & \text{Pour porte "ET"} \\ 1 - \prod_{i=1}^{N} \left(1 - P_i(t)\right), & \text{Pour porte "OU"} \end{cases} \tag{3.10}$$

3.4.3. Estimation des probabilités des événements de base par les experts

Dans la suite de cette étude, nous traitons la question de jugements d'experts pour l'estimation des probabilités de défaillance relatives aux événements de base. Dans ce contexte, comme nous l'avions déjà mentionné, la combinaison de la théorie des ensembles flous et de l'opinion d'expert peut aider l'expert à surmonter toute ambiguïté possible comme explique Yazdi *et al.,* (2017). Pour résoudre le problème des poids incertains des différents experts, nous utilisons dans ce travail la technique de *l'opérateur de la moyenne pondérée ordonnée incertaine dépendante améliorée* (*DUOWA*) pour synthétiser les informations des évaluations avec des poids incertains. Par conséquent, l'opinion agrégée de l'expert est pondérée en calculant la similarité entre le score imprécis de l'évaluation de chaque expert et le score imprécis de la valeur d'évaluation moyenne. En effet, lorsque les experts traitent des valeurs incertaines, telle que la probabilité d'un événement de base, ils utilisent plus facilement l'expression linguistique que le jugement numérique (Arici *et al.,* 2020).

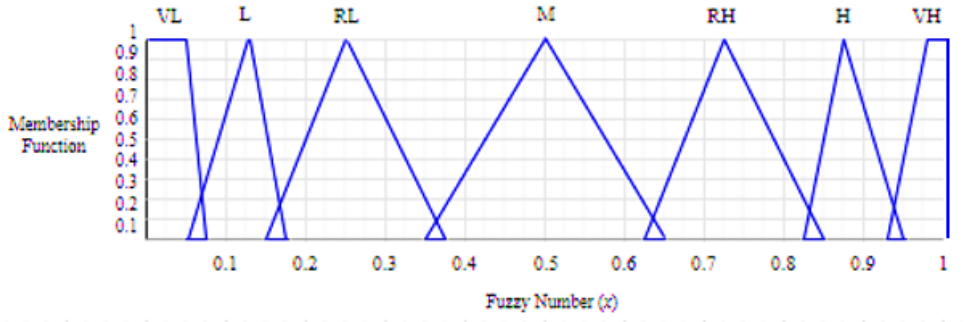
En règle générale, les nombres flous trapézoïdaux ou triangulaires sont utilisés pour décrire les probabilités des événements de base dans l'analyse par arbre de défaillance. Il était clairement indiqué que les termes linguistiques varient généralement de 5 à 9 (Rajakarunakaran *et al.,* 2015). De plus, sept termes linguistiques ont été utilisés dans cette étude : *très faible, faible, relativement faible, moyenne, relativement élevé, élevé* et *très élevé*. Notons que l'excès de termes linguistiques peut dérouter les experts dans la réponse aux questions. L'échelle linguistique ci-dessus est utilisée pour déterminer les jugements qualitatifs des experts concernant la défaillance des différentes composantes du système en cas de nombre triangulaire et trapézoïdal flou, (voir tableau 3.6 et 3.7). La figure 3.4, représente graphiquement les fonctions d'appartenance de nombre triangulaire et trapézoïdal flou.

TABLEAU 3.6 – Fonctions d'appartenance des nombres triangulaires flous (Rajakarunakaran *et al.,* 2015).

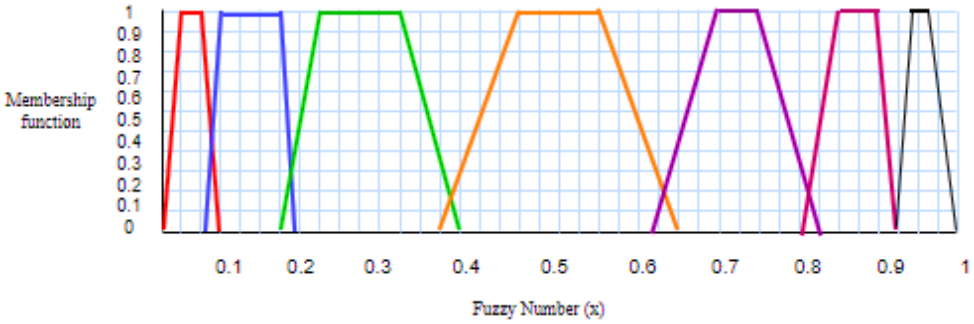
Variables linguistiques	Nombre triangulaire flou (P^L, P^M, P^U)
Très faible	(0, 0.04, 0.08)
Faible	(0.07, 0.13, 0.19)
Relativement faible	(0.17, 0.27, 0.37)
Moyenne	(0.35, 0.50, 0.65)
Relativement élevé	(0.62, 0.73, 0.82)
Elevé	(0.81, 0.87, 0.93)
Très élevé	(0.92, 0.96, 1.00)

TABLEAU 3.7 – Fonctions d'appartenance des nombres trapézoïdaux flous.

Variables linguistiques	Nombre trapézoïdal flou (P^L, P^M, P^N, P^U)
Très faible	(0, 0.03, 0.05, 0.08)
Faible	(0.07, 0.10, 0.15, 0.19)
Relativement faible	(0.17, 0.20, 0.30, 0.37)
Moyenne	(0.35, 0.45, 0.55, 0.65)
Relativement élevé	(0.62, 0.70, 0.75, 0.82)
Elevé	(0.81, 0.85, 0.90, 0.93)
Très élevé	(0.92, 0.94, 0.96, 1.00)



(a). Nombre triangulaire flou



(b). Nombre trapézoïdal flou.

FIGURE 3.4 – Représentation graphique des fonctions d'appartenance du nombre flou.

La prise en compte des incertitudes dans l'analyse par AdD consiste à propager les données incertaines relatives aux événements de base jusqu'aux niveaux supérieurs. Etant donné que les probabilités des événements de base sont exprimées en termes de nombres flous, il est donc nécessaire d'utiliser des opérations arithmétiques floues pour effectuer les opérations mathématiques aux niveaux des portes logiques ET et OU, comme expliquent Cozzani *et al.*, (2009). Dans la suite nous expliquons la procédure utilisée dans ce travail à cet effet. Dans notre travail, l'évaluation de la disponibilité d'une barrière de sécurité est se fait selon

les équations (3.8) et (3.9), c'est-à-dire que le facteur du temps ne prend pas en considération.

Si l'on considère un nombre flou triangulaire, $\tilde{P}_k = (P_k^L, P_k^M, P_k^U)$, où $0<P_k^L \leq P_k^M \leq P_k^U$, et P_k^L, P_k^M, P_k^U représentent respectivement la borne inférieure, la médiane et la borne supérieure de $\tilde{P}_k$. Sa fonction d'appartenance peut être représentée par l'équation (3.11).

$$\mu(x) = \begin{cases} \frac{x-P_k^L}{P_k^M-P_k^L}, & P_k^L \leq x \leq P_k^M \\ \frac{P_k^U-x}{P_k^U-P_k^M}, & P_k^M \leq x \leq P_k^U \\ 0, & sinon \end{cases} \tag{3.11}$$

La mise ouvre du *DUOWA* nécessite plusieurs étapes, telles expliquées dans la suite.

- ***Etape* 1.**Calcul de la moyenne floue arithmétique relative aux n évaluations des experts. Le résultat est le nombre flou triangulaire $\tilde{P}_a = (P_a^L, P_a^M, P_a^U)$, obtenu via l'équation (3.12):

$$\tilde{P}_a = \begin{cases} P_a^L = \frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n} P_k^L \\ P_a^M = \frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n} P_k^M, \quad k = 1, 2, \dots., n \\ P_a^U = \frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n} P_k^U \end{cases} \tag{3.12}$$

- ***Etape* 2.** Calcul de la distance $d(\tilde{P}_k, \tilde{P}_a)$ entre $\tilde{P}_k$ et $\tilde{P}_a$ définie par l'équation (3.13),:

$$d(\tilde{P}_k, \tilde{P}_a) = \frac{1}{3}(|P_k^L - P_a^L| + |P_k^M - P_a^M| + |P_k^U - P_a^U|), \; k = 1,2, \dots, n \tag{3.13}$$

- ***Etape* 3.** Calcul du degré de similarité $s(\tilde{P}_k, \tilde{P}_a)$ entre $\tilde{P}_k$ et $\tilde{P}_a$:

$$s(\tilde{P}_k, \tilde{P}_a) = 1 - \frac{d(\tilde{P}_k, \tilde{P}_a)}{\sum_{k=1}^{n} d(\tilde{P}_k, \tilde{P}_a)}, \quad k = 1,2, \dots, n \tag{3.14}$$

- ***Etape* 4.** Calcul des poids des experts ω_k à l'aide de l'équation (3.15) :

$$\omega_k = \frac{s(\tilde{P}_k, \tilde{P}_a)}{\sum_{k=1}^{n} s(\tilde{P}_k, \tilde{P}_a)}, \quad k = 1,2, \dots, n \tag{3.15}$$

- ***Etape* 5**. L'agrégation finale est obtenue en utilisant l'opérateur de la moyenne pondérée ordonnée incertaine dépendante (*DUOWA*) comme illustré par l'équation (3.16):

$$\tilde{P} = (P^L, P^M, P^U) = DUOWA(\tilde{P}_1, \tilde{P}_2, \dots., \tilde{P}_n) = \sum_{k=1}^{n} \omega_k \tilde{P}_k \tag{3.16}$$

Si l'on se réfère à l'opération d'addition des nombre flous triangulaires, P^L, P^M, P^U sont définis ainsi :

$$\begin{cases} P^L = \sum_{k=1}^{n} \omega_k \, P_k^L \\ P^M = \sum_{k=1}^{n} \omega_k \, P_k^M \\ P^U = \sum_{k=1}^{n} \omega_k \, P_k^U \end{cases} \tag{3.17}$$

Afin d'améliorer l'opérateur *DUOWA*, nous proposons la méthode du centre de la surface pour la défuzzification du nombre flou $\tilde{P}$.

- ***Etape 6.*** Défuzzification par la méthode du centre de la surface. Dans le processus de défuzzification, le nombre flou triangulaire obtenu $\tilde{P}$ est converti en une valeur nette appelée *possibilité de défaillance nette (CFP : Crisp Failure Possibility)*. Dans cette étude, la méthode de défuzzification du centre de la zone (surface) a été adoptée, voir l'équation (2.42) de chapitre (2). Par conséquent, la défuzzification du nombre flou triangulaire $\tilde{P} = (P^L, P^M, P^U)$ est donnée par l'équation (3.18) :

$$CFP = \frac{\int_{P^L}^{P^M} \frac{x - P^M}{P^M - P^L} \, x \, dx + \int_{P^M}^{P^U} \frac{P^U - x}{P^U - P^M} \, x \, dx}{\int_{P^L}^{P^M} \frac{x - P^M}{P^M - P^L} \, dx + \int_{P^M}^{P^U} \frac{P^U - x}{P^U - P^M} \, dx}$$

$$CFP = \frac{1}{3}(P^L + P^M + P^U) \tag{3.18}$$

- ***Etape 7.*** Convertir la *CFP* en probabilité de défaillance (*FP : Failure Probability*) (Daas *et al.*, 2023, a-d). La probabilité de défaillance de chaque événement de base est calculée selon la formule (Onisawa, 1988), voir les équations (3.19) et (3.20) :

$$FP = \begin{cases} 1/10^K, & \text{CFP} \neq 0 \\ 0, & \text{CFP} = 0 \end{cases} \tag{3.19}$$

$$K = \left[\left(\frac{1}{CFP} - 1\right)\right]^{1/3} \times 2.301 \tag{3.20}$$

3.4.4. Evaluation de la probabilité de l'événement sommet

Les probabilités de tous les événements de base sont générées à l'aide des étapes mentionnées ci-dessus. Si les probabilités de tous les événements de base sont connues, la probabilité de défaillance de l'événement sommet peut être facilement calculée. Pour ce faire, nous avons utilisé le logiciel GRIF qui se base sur la technologie BDD, comme nous l'avions déjà mentionné. Toutefois, une approche fondée sur les coupes minimales (*MCS : Minimal Cut-sets*) pourrait être utilisée dans le cas où ces dernières sont indépendantes :

$$P\left(MCS_j\right) = \prod_{i=1}^{n} P\left(BE_i\right) \tag{3.21}$$

$$P(TE) = 1 - \prod_{j=1}^{k}(1 - P(MCS_j)) \quad (3.22)$$

Où $P(BE_i)$ représente la probabilité de l'événement de base i, $P(MCS_j)$ est la probabilité de la coupe minimale j et $P(TE)$ désigne la probabilité de l'événement sommet.

3.4.5. Analyse de sensibilité

Lors de l'analyse quantitative d'un système particulier, les différents contributeurs à la défaillance de ce système doivent être classés. A partir de ce classement, les ressources peuvent être allouées en fonction de l'importance de chacun des composants. Diverses mesures d'importance ont été développées dans la littérature (Rauzy, 1993), notamment le facteur d'importance marginale de Birnbaum (MIF), facteurs d'importance critique (CIF), mesure d'importance différentielle (DIM), facteur de réduction du risque (RW), etc. Chaque facteur offre des objectifs spécifiques.

Le Tableau 3.8 résume certains facteurs d'importance courants. Ces méthodes sont basées sur certaines formes d'estimation de l'influence de la probabilité de défaillance de chaque composant sur la probabilité de défaillance du système considéré. Dans ce tableau, $P(TE)$ fait référence à la probabilité de l'événement sommet, $P(TE/x_i = 0)$ est cette même probabilité lorsque le composant i est supposé fonctionner parfaitement ou en panne totale pour le cas $P(TE/x_i = 1)$, $j = 1, 2, , \dots, n$ où n est le nombre de composants ou d'événements de base dans le système, $k = 1, 2, , \dots, m$ où m représente le nombre des coupes minimales contenant l'événement *i*.

Dans notre travail, nous avons retenu deux mesures d'importance à savoir :

- Le facteur de réduction de risque (*RRW : Risk Reduction Worth*). Ce facteur a été introduit comme facteur d'importance dans les études probabiliste des risques des centrales nucléaires. Il est définit par le rapport entre la probabilité de l'événement sommet et cette même quantité étant le composant *i* supposé parfait.
- Facteur d'importance de Fussell-Vesely (*FV*). Ce facteur d'importance représente la probabilité de réalisation d'au moins une coupe minimale contenant le composant i sachant que le système considéré est en panne. La formule correspondante présentée dans le tableau 3.8 est une formule approximative valable lorsque les probabilités des événements de base sont négligeables devant l'unité ($\ll 1$). Ce facteur permet de rendre compte de la contribution de l'événement *i* à la défaillance du système sans pour autant être critique (Rausand, 2015).

TABLEAU 3.8 – Exemples des mesures d'importance.

Mesure d'importance	Equation mathématique
$MIF(x_i)$	$P(TE/x_i = 1) - P(TE/x_i = 0)$
$CIF(x_i)$	$MIF(x_i) \cdot \frac{P(x_i)}{P(TE)}$
$DIM\ (x_i)$	$\frac{\frac{\partial P}{\partial x_j} x_i}{\sum_{j=1}^{n} \frac{\partial \mathrm{P}}{\partial x_j} x_j}$
$RRW\ (x_i)$	$\frac{P(TE)}{P(TE/x_i = 0)}$
$FV(x_i)$	$\approx \frac{\sum_{k=1}^{m} P(MCS_k)}{P(TE)}$

3.5. Analyse subjectives de la contribution des actions correctives à la sécurité à l'aide de la théorie du raisonnement probant

L'optimisation de la fiabilité des barrières de sécurité d'urgence est une activité importante pour la maitrise des accidents majeurs dans l'industrie des procédés. Dans la littérature, plusieurs approches d'optimisation ont été proposées. Généralement, ces approches incluent l'un ou plusieurs aspects, tels que les intervalles de maintenance préventives, des différents couts, choix de technologies, redondance, … (Zhen *et al.*, 2021, Hosseini *et al.*, 2020, Han *et al.*, 2019, Guo *et al.*, 2022, Innal *et al.*, 2015 ; Daas *et al.*, 2023, d). Dans ce travail, proposons de faire usage d'une autre forme d'amélioration de la fiabilité des barrières de sécurité, visant un choix optimal des actions correctives proposées.

En effet, des actions correctives sont généralement proposées afin de remédier à des situations présentant des risques non acceptables. Bien entendu, ces actions visent en priorité les éléments critiques du système, qui peuvent être identifiés via les facteurs d'importance. Cependant, une réflexion doit être conduite concernant la sélection des actions les plus efficaces en termes de réductions du risque et donc l'amélioration de la sécurité. A ce titre, l'objectif de cette sous-section est de déterminer quelle est l'action corrective la plus à même permettant l'amélioration de la fiabilité de la barrière de sécurité. Cependant, l'indisponibilité et le manque de données rendent difficile l'évaluation correcte de l'efficacité des actions correctives proposés. Par conséquent, le recours aux jugements d'experts, qui peuvent être subjectifs, reste une alternative intéressante. Dans ce qui suit, nous présentons une démarche d'évaluation appropriée basée sur une technique d'analyse subjective de la sécurité des actions correctives en utilisant la théorie du raisonnement probant (Wang *et al.*, 1995, Gao *et al.*, 2022).

Considérons le score de sécurité $\boldsymbol{S_i}$ caractérisé par $\boldsymbol{\mu_{S_i}}$ qui décrit la l'efficacité de la *i*ème action corrective. Ici, cette efficacité peut être exprimée plus précisément en termes de variables linguistiques. Par exemple, il est admis qu'elle peut être exprimée par le degré selon lequel elle appartient à des variables linguistiques telles que « *médiocre* », « *moyenne* », « *bonne* » et « *excellente* ». Chacune de ces variables linguistiques peut être appelée une expression de *sécurité*. Pour être évalué en fonction de ces variables linguistiques, il est nécessaire de les caractériser à l'aide des valeurs d'appartenance aux sept catégories définies dans le Tableau 3.9.

TABLEAU 3.9 – Expressions de sécurité (Wang *et al.*, 1995) (Daas *et al.*, 2023, d).

μ_{S_i}	Catégories						
Variables linguistiques	1	2	3	4	5	6	7
Médiocre	0	0	0	0	0	0.75	1
Moyenne	0	0	0	0.5	1	0.25	0
Bonne	0	0.25	1	0.5	0	0	0
Excellente	1	0.75	0	0	0	0	0

En utilisant la méthode du meilleur ajustement (Yazdi *et al.*, 2020), la description résultante du score de sécurité $\boldsymbol{S_i}$ de chaque action corrective peut être définie par une (ou toutes) expressions de sécurité (c'est-à-dire « *médiocre* », « *moyenne* », « *bonne* » et « *excellente* ») (Wang, 2000). La méthode utilise la distance d_{ij} entre le score de sécurité identifié S_i et chacune des expressions de sécurité telle que définie par les équations (3.23), (3.24), (3.25) et (3.26), (Daas *et al.*, 2023, d-e) :

$$d_{i1}(S_i, poor) = \left[\sum_{k=1}^{7}(\mu_{S_i}^k - \mu_{poor}^k)^2\right]^{1/2}, \quad i = 1,2,3,4 \tag{3.23}$$

$$d_{i2}(S_i, average) = \left[\sum_{k=1}^{7}(\mu_{S_i}^k - \mu_{average}^k)^2\right]^{1/2}, \quad i = 1,2,3,4 \tag{3.24}$$

$$d_{i3}(S_i, good) = \left[\sum_{k=1}^{7}(\mu_{S_i}^k - \mu_{good}^k)^2\right]^{1/2}, \quad i = 1,2,3,4 \tag{3.25}$$

$$d_{i4}(S_i, excellent) = \left[\sum_{k=1}^{7}(\mu_{S_i}^k - \mu_{excellent}^k)^2\right]^{1/2}, \quad i = 1,2,3,4 \tag{3.26}$$

Supposons que d_{ij} $(1 \leq J \leq 4)$ soit la plus petite distance parmi les distances obtenues pour S_i et que α_{i1}, α_{i2}, α_{i3} et α_{i4} représentent les inverses des distances relatives entre S_i et chacune des expressions de sécurité définies en référence à d_{iJ}. Alors, α_{ij} $(j = 1,2,3,4)$ peut être définis comme suit:

$$\alpha_{ij} = \frac{1}{d_{ij}/d_{iJ}} = \frac{d_{iJ}}{d_{ij}}, \quad j = 1,2,3,4 \tag{3.27}$$

On suppose que si $d_{iJ} = 0$, α_{iJ}= 1 et les autres α_{ij} = 0.

α_{ij} $(j = 1,2,3,4)$ peuvent être normalisés comme montré à l'équation (3.28):

$$\beta_{ij} = \frac{\alpha_{ij}}{\sum_{m=1}^{4} \alpha_{im}}, \quad j = 1,2,3,4 \tag{3.28}$$

Chaque β_{ij} $(j = 1,2,3,4)$ représente la mesure dans laquelle S_i appartient à la *j*ème expression de sécurité. On peut noter que si S_i appartient complètement à la *j*ème expression alors β_{ij} est égal à 1 et les autres β_{ij} sont égaux à 0. La somme des valeurs de ces indices pour S_i est égale à 1, soit $\sum_{j=1}^{4} \beta_{ij} = 1$. Ainsi, β_{ij} pourrait être considéré comme un degré de confiance selon laquelle S_i appartient à la *j*ème expression de sécurité.

La sécurité subjective de toute action corrective peut être agrégée en combinant toutes les estimations adoptées par l'approche du raisonnement probant. La note d'agrégation pour S_i peut être vue comme la moyenne pondérée de la somme des score d'agrégation de *n* experts, notée AS_i^j, donnée l'équation (3.29) suivante:

$$AS_i^j = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} \beta_{ij}, \quad j = 1,2,3,4 \tag{3.29}$$

3.6. Conclusion

Ce chapitre proposait une démarche d'amélioration de la fiabilité des barrières de sécurité d'urgence. Pour ce faire, nous avons d'abord proposé une approche permettant la hiérarchisation des impacts de perturbation des barrières de sécurité sur le personnel, l'environnement, le public et sur la production, en se basant sur la méthode AMPEC et la méthode AHP floue. Ensuite, nous avons proposé l'usage de la méthode AdD pour évaluer la disponibilité des barrières de sécurité, du fait de son pouvoir de modélisation confirmé. Puis, afin d'évaluer les probabilités des événements de base via les jugements d'experts, nous avons fait recours à l'opérateur de la moyenne pondérée ordonnée incertaine dépendante amélioré. Toujours dans le cadre de l'analyse par AdD, nous avons opté pour une identification des événements de base critiques à l'aide de deux facteurs d'importance usuels, à savoir le facteur de réduction de risque (RRW) et le facteur de Fussell-Vesely (*FV*). Finalement, nous avons proposé une procédure qui permet la détermination des actions correctives les plus efficaces pour améliorer la fiabilité de la barrière de sécurité considérée, à l'aide de l'analyse subjective de la sécurité et de la théorie du raisonnement probant. Précisons que ces actions correctives sont proposées sur la base des résultats de l'analyse d'importance des événements de base.

Chapitre 4

Etude de Cas sur l'unité de stockage GPL Hassi Messaoud

4.1. Introduction

Les zones de stockage de produits chimiques sont parmi les endroits où se produisent les scénarios les plus catastrophiques. Des barrières de sécurité d'urgence doivent donc être mises en place pour la prévention ou l'intervention avec une très grande fiabilité. L'évaluation de la fiabilité des barrières de sécurité d'urgence est donc essentielle pour une meilleure prévention et gestion des accidents industriels majeurs.

Dans ce chapitre, nous appliquons l'approche proposée au niveau du deuxième chapitre aux barrières de sécurité d'urgence installées au niveau de la zone de stockage de GPL du complexe ZCINA. Cette étude de cas permet de démontrer la pertinence de la méthode proposée. Pour ce faire, nous allons d'abord présenter brièvement l'unité GPL objet de l'étude. Ensuite, nous abordons l'analyse des risques liés au stockage de GPL à l'aide des méthodes HAZOP et AdE. Une fois l'événement initiateur défini, nous évaluons les probabilités de défaillance floues des barrières de sécurité. Dans ce cas, les facteurs de risque doivent être hiérarchisés par la méthode AMPEC et la méthode AHP floue. Cette hiérarchisation a pour but de déterminer l'impact des perturbations des composants du système automatique de lutte contre l'incendie sur le personnel, l'environnement, le public et sur la production. Cela nécessite une évaluation de la disponibilité de ce système via la méthode AdD et la détermination des composants les plus critiques afin d'améliorer sa fiabilité. Pour ce faire, des actions correctives sont proposées. Optimiser la fiabilité du système automatique de lutte contre l'incendie consiste ensuite à déterminer quelle est l'action corrective la plus pertinente.

4.2. Description de l'unité GPL (Hassi Messaoud)

Cette usine de traitement de GPL est mise en service en 2012. Elle permet de récupérer les GPL et les condensats à partir du gaz associé provenant de l'unité de traitement de pétrole brut du complexe CINA ainsi que du gaz associé provenant de la nouvelle unité LDHP (Ligne Directe Haute Pression) du complexe ZCINA. La figure 4.1, présente une vue 3 dimensions (3D) de l'unité GPL.

Le GPL produit au niveau du ballon de reflux du débutaniseur de chaque train G11/G12/G13-VL-32-05 alimente la section de stockage via le collecteur commun de GPL conforme aux spécifications et/ou le collecteur commun de GPL hors spécifications.

Le système de stockage de GPL se compose de 3 sphères (31G-RD-33-01 A/B/C) ayant chacune une capacité de 500 m^3, comme illustré dans la figure 4.2. Le GPL est stocké sous une pression allant de de 15 à 21 barg et une température qui ne dépasse pas les 35 C°. L'expédition du GPL vers l'oléoduc est réalisée par les pompes 35-PA-35-04 A/B. Le débit normal d'expédition du GPL est de 602 m^3/h.

Le stockage hors spécification 32G-RD-33-01 est destiné à recueillir le GPL venant du débutaniseur tant que les spécifications ne sont pas respectées. Le GPL sera par la suite

acheminé par deux pompes centrifuges (35G-PA 33-01 A/B) pour être expédié vers la station de pompage hors complexe ZCINA.

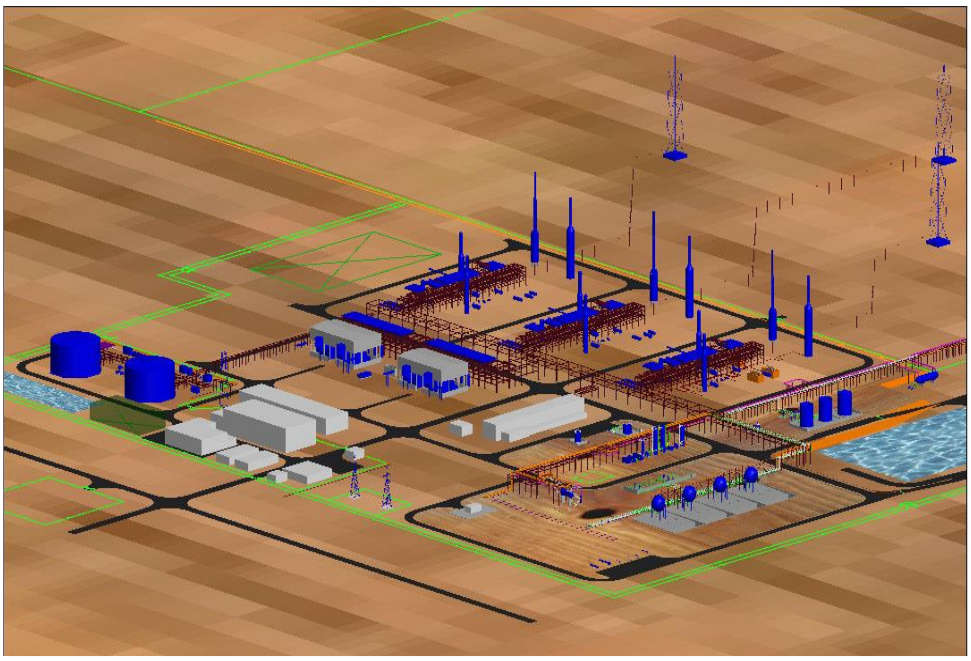


FIGURE 4.1 – Vue 3D de l'unité GPL (Sonatrach, 2010).

Compte tenu des capacités stockées, une large fuite sur une sphère de GPL est susceptible de générer un feu de nappe autour de la sphère. Ainsi, les sphères sont exposées aux risques d'incendie (ERI) et génèrent une Zone Exposée aux Risques d'Incendie (ZERI).

Une ZERI est définie conformément aux recommandations de l'API 2218 (API 2218, 1999) de la manière suivante :

- 12 m dans l'axe horizontal et 12 m dans l'axe vertical pour tout ERI identifié, à l'exception des sphères de stockage GPL.
- 15 m dans l'axe horizontal et 9 m dans l'axe vertical pour les sphères GPL

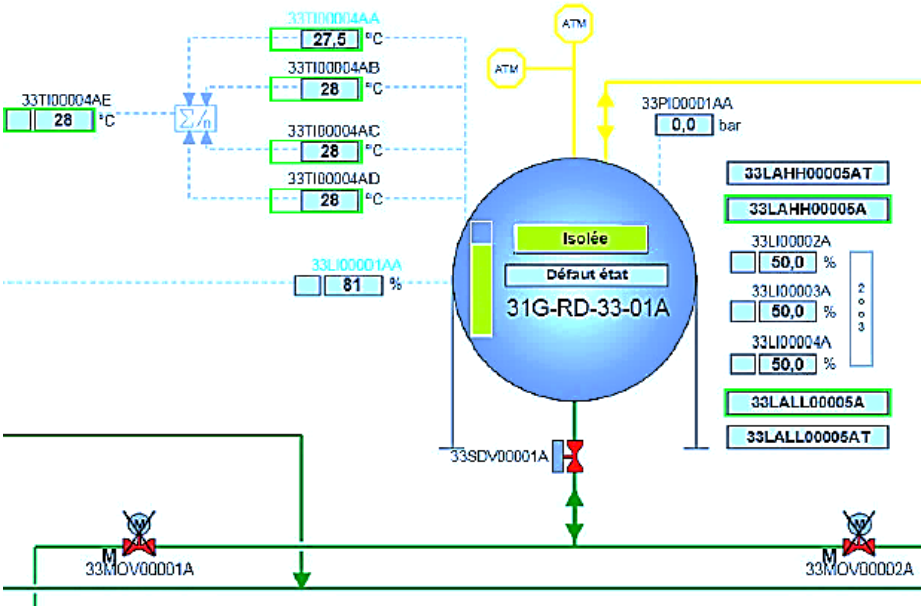


FIGURE 4.2 – Schéma simplifié de la sphère de stockage GPL.

4.3. Analyse des risques liés aux stockages de GPL

Cette analyse est conduite dans un premier temps via la méthode HAZOP, qui vise à identifier les dangers potentiels de manière structurée et systématique afin d'identifier les barriers préventives à mise en œuvre. Le tableau 4.1, présente un extrait de l'étude HAZOP qui a été élaborée par le bureau d'études DNV dans le cadre d'une étude de dangers (il faut mettre le numéro du rapport comme référence). Les résultats de cette étude montrent que l'événement redouté est la « perte de confinement », suite à une rupture, une fuite importante, une fuite moyenne ou une petite fuite, avec une forte probabilité d'être suivie d'ignition immédiate, ignition retardée ou bien une explosion. Le tableau 4.2 montre les probabilités de réalisation de ces derniers. Les scénarios d'accidents correspondants sont : feu de nappe, feu de chalumeau, VCE et pollution. La figure 4.3 présente l'AdE relatif au développement de ces différents scénarios accidentels. Il faut mentionner qu'une propagation des effets dominos est possible (phénomène BLEVE, …).

Selon le tableau 4.3, les fréquences d'occurrence des scénarios catastrophiques sont jugées minimes, mais leurs occurrences peuvent causer de graves dommages aux personnes, aux installations et à l'environnement et entraîner de graves pertes économiques. A ce titre, la sécurité globale de ces zones de stockage de GPL ne doit pas être négligée et donc les barrières de sécurité d'urgences efficaces, qui peuvent assurées la prévention ainsi que des interventions pour réduire les dommages, sont nécessaires.

TABLEAU 4.1 – Extrait de l'étude HAZOP de la zone de stockage GPL.

Mot clés	Déviation	Causes	Conséquence	Sécurité existant	Actions d'amélioration
-Niveau	- Haut niveau	-Sur-remplissage	-Risque d'incendie et d'explosion (BLEVE)	-Détection incendie/gaz et arrêt d'urgence.	-Contrôle périodique
				-Système automatique de lutte contre l'incendie.	
				-Plan d'intervention d'urgence en cas d'incendie	
			-Risque de surpression	-Arrêt d'urgence (33LI00002/3/4)	-Utiliser des détecteurs plus efficaces.
					-Vannes auto-manuelle
-Niveau	- Bas niveau	-Défaillance en position ouverte de la vanne de niveau.	-Vidange totale de la sphère et risque de cavitation	-Sécurité de niveau très bas (33LI00002/3/4) qui arrêtent la pompe et tournant la vanne de sécurité (33SDV00001)	- Contrôle périodique
			-Endommagement des pompes d'export		-Contrôle des vannes

TABLEAU 4.2 – Probabilité d'occurrence des événements liés à la perte de confinement (Sonatrach, 2010).

Perte de confinement	Ignition immédiate	Ignition retardée	Explosion
Grande fuite : 2.56E-06/an	0.7	0.7	0.4
Moyenne fuite : 4.40E-06/an	0.5	0.2	0.3
Petite fuite : 2.48E-04/an	0.2	0.06	0.2

TABLEAU 4.3 – Fréquence d'occurrence des scénarios catastrophiques (Sonatrach, 2010).

Scénario catastrophique	Fréquence d'occurrence / an
Feu de nappe (feu de flaque)	7.05E-05
Feu de chalumeau (feu de torche)	6.74E-05
VCE	3.10E-06
Pollution	1.89E-04

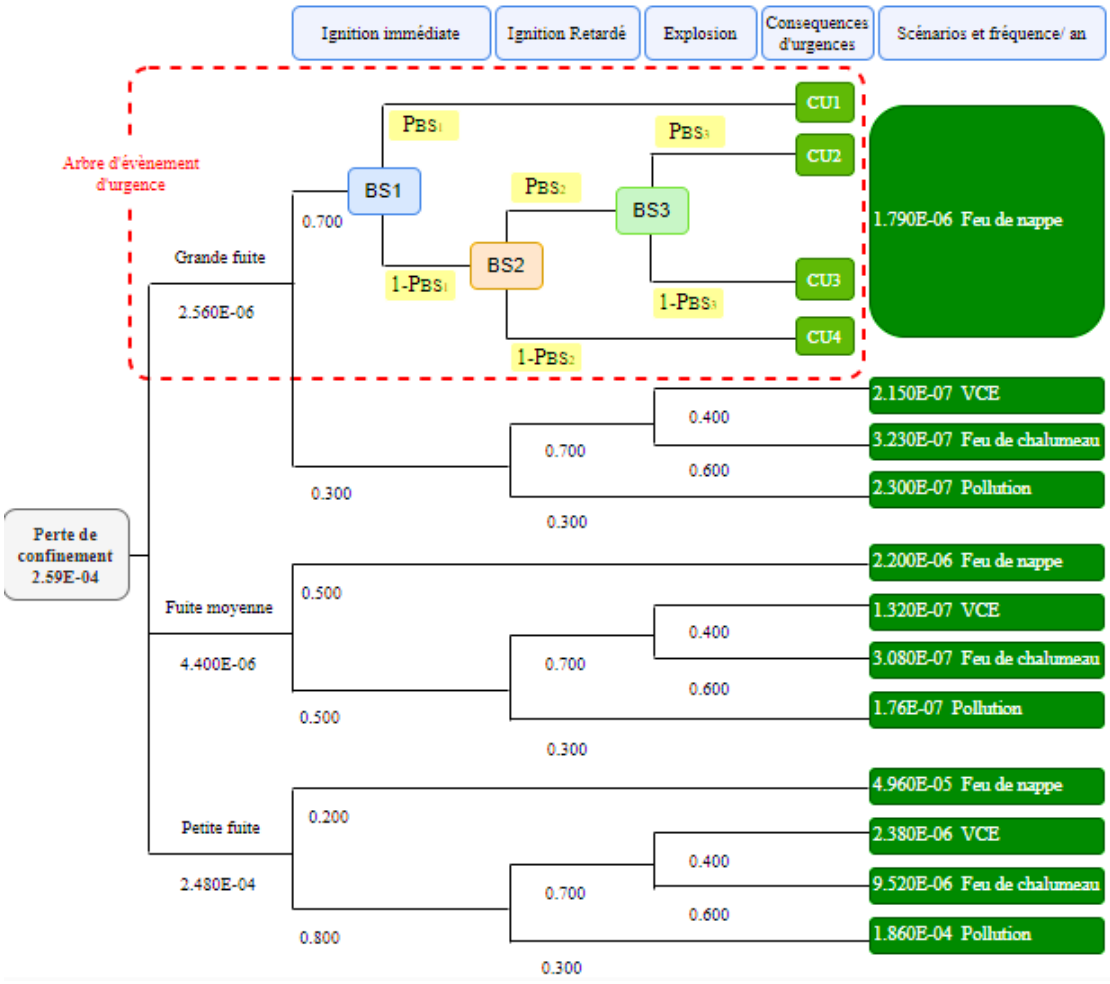


FIGURE 4.3 – Arbre d'événement classique des scénarios d'accidents dans la zone de stockage de GPL (Daas *et al.*, 2023, b-d-e).

Selon les résultats de l'étude HAZOP, pour éviter une fuite importante de GPL, trois barrières de sécurité d'urgence doivent être installées :

(1) Détection feu/gaz et arrêt d'urgence. Cette barrière a pour mission de détecter un début d'incendie ou des fuites de GPL.
(2) Système automatique de lutte contre l'incendie. Le rôle de cette barrière est de refroidir les sphères de stockage et d'éteindre les incendies.
(3) Plan d'intervention d'urgence en cas d'incendie. Cette barrière est organisationnelle. L'objectif de cette barrière est d'assurer la coordination entre les équipes d'intervention pour limiter les dégâts occasionnés en cas d'incendie.

Selon la matrice du risque de l'unité GPL illustrée dans la figure 4.4, la perte de confinement liés au stockage GPL est caractérisé par une criticité du risque faible, dont la probabilité d'occurrence est rare, par contre la gravité est désastreuse.

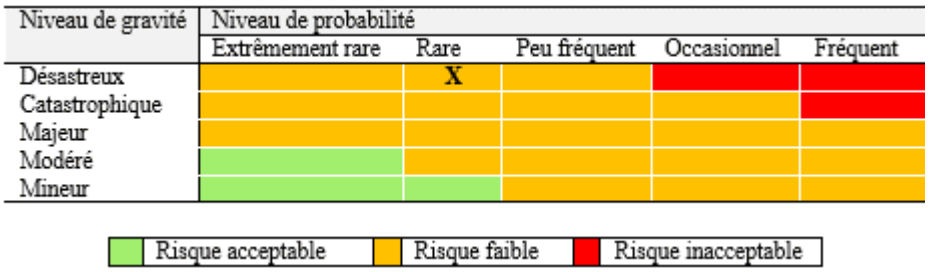


FIGURE 4.4 – Matrice du risque de l'unité GPL (Sonatrach, 2010).

4.4. Evaluation de la probabilité de défaillance floue des barrières de sécurité d'urgence

Trois experts ont participé dans cette étude. Ils possèdent des profils différents, ce qui impacte leur capacité de jugement quant à l'évaluation barrières de sécurité d'urgence. Le système de données et les caractéristiques des expertes sont illustrés respectivement au tableau 4.4 et à la figure 4.5.

TABLEAU 4.4 – Caractéristiques des experts (Daas *et al.*, 2023, b- d).

Expert (E)	Poste Professionnel (P)	Expérience de travail (E)	Niveau d'éducation (N)	Age (A)
E1	Cadre universitaire	10- 19	Master	53
E2	Cadre universitaire	≤5	PhD	43
E3	Ingénieur	6- 9	Master	41

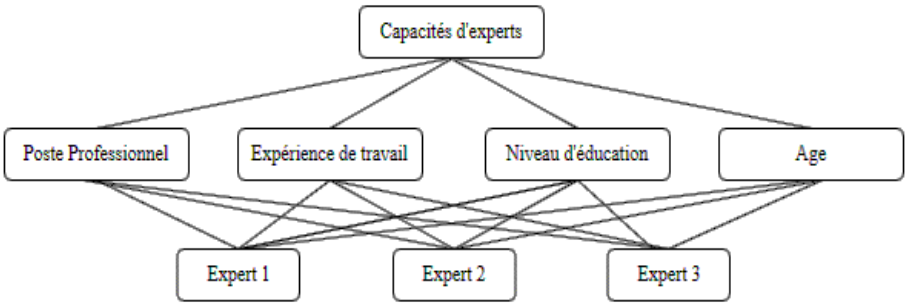


FIGURE 4.5 – Système AHP pour l'évaluation d'experts (Daas *et al.*, 2023, b- d).

Dans notre étude, un nombre triangulaire flou de type 2 a été utilisé dans la méthode AHP. A cet effet, et selon les détails individuels des experts représentant l'importance de leurs capacités, des matrices de comparaison par paires relative au poste professionnel (P), à l'expérience de travail (E), au niveau d'éducation (N) et à l'âge (A) sont fournies comme suit (Daas *et al.*, 2023, b- d).:

$$P = \begin{bmatrix} (1.1.1;1)(1,1,1;1) & (1,1,1;1)(1,1,1;1) & (1.5,3,4.5;1)(2.5,3,3.5;0.9) \\ (1.1.1;1)(1,1,1;1) & (1.1.1;1)(1,1,1;1) & (1.5,3,4.5;1)(2.5,3,3.5;0.9) \\ \left(\frac{1}{4.5},\frac{1}{3},\frac{1}{1.5};1\right)\left(\frac{1}{3.5},\frac{1}{3},\frac{1}{2.5};0.9\right) & \left(\frac{1}{4.5},\frac{1}{3},\frac{1}{1.5};1\right)\left(\frac{1}{3.5},\frac{1}{3},\frac{1}{2.5};0.9\right) & (1.1.1;1)(1,1,1;1) \end{bmatrix}$$

$$E = \begin{bmatrix} (1.1.1;1)(1,1,1;1) & (3.5,5,6.5;1)(4.5,5,5.5;0.9) & (1.5,3,4.5;1)(2.5,3,3.5;0.9) \\ \left(\frac{1}{6.5},\frac{1}{5},\frac{1}{3.5};1\right)\left(\frac{1}{5.5},\frac{1}{5},\frac{1}{4.5};0.9\right) & (1.1.1;1)(1,1,1;1) & \left(\frac{1}{4.5},\frac{1}{3},\frac{1}{1.5};1\right)\left(\frac{1}{3.5},\frac{1}{3},\frac{1}{2.5};0.9\right) \\ \left(\frac{1}{4.5},\frac{1}{3},\frac{1}{1.5};1\right)\left(\frac{1}{3.5},\frac{1}{3},\frac{1}{2.5};0.9\right) & (1.5,3,4.5;1)(2.5,3,3.5;0.9) & (1.1.1;1)(1,1,1;1) \end{bmatrix}$$

$$N = \begin{bmatrix} (1.1.1;1)(1,1,1;1) & (1.5,3,4.5;1)(2.5,3,3.5;0.9) & (1.5,3,4.5;1)(2.5,3,3.5;0.9) \\ \left(\frac{1}{4.5},\frac{1}{3},\frac{1}{1.5};1\right)\left(\frac{1}{3.5},\frac{1}{3},\frac{1}{2.5};0.9\right) & (1.1.1;1)(1,1,1;1) & (1.1.1;1)(1,1,1;1) \\ \left(\frac{1}{4.5},\frac{1}{3},\frac{1}{1.5};1\right)\left(\frac{1}{3.5},\frac{1}{3},\frac{1}{2.5};0.9\right) & (1.1.1;1)(1,1,1;1) & (1.1.1;1)(1,1,1;1) \end{bmatrix}$$

$$A = \begin{bmatrix} (1.1.1;1)(1,1,1;1) & \left(\frac{1}{4.5},\frac{1}{3},\frac{1}{1.5};1\right)\left(\frac{1}{3.5},\frac{1}{3},\frac{1}{2.5};0.9\right) & (1.1.1;1)(1,1,1;1) \\ (1.5,3,4.5;1)(2.5,3,3.5;0.9) & (1.1.1;1)(1,1,1;1) & (1.5,3,4.5;1)(2.5,3,3.5;0.9) \\ (1.1.1;1)(1,1,1;1) & \left(\frac{1}{4.5},\frac{1}{3},\frac{1}{1.5};1\right)\left(\frac{1}{3.5},\frac{1}{3},\frac{1}{2.5};0.9\right) & (1.1.1;1)(1,1,1;1) \end{bmatrix}$$

La matrice synthétique de comparaison par paires utilisant la technique de la moyenne géométrique est obtenue comme suit :

b_{12}

$= ((1,1,1;1)(1,1,1;1) \otimes (3.5,5,6.5;1)(4.5,5,5.5;0.9) \otimes (1.5,3,4.5;1)(2.5,3,3.5;0.9) \otimes \left(\frac{1}{4.5},\frac{1}{3},\frac{1}{1.5};1\right)\left(\frac{1}{3.5},\frac{1}{3},\frac{1}{2.5};0.9\right))^{\frac{1}{4}}$

$b_{12} = ((1.16,4.99,19.51;1)(0.71,4.99,7.70;0.9))^{\frac{1}{4}} = (1.03,1.49,2.10;1)(0.92,1.49,1.66;0.9$

Par conséquent, la matrice synthétique de comparaison par paires des quatre capacités expertes est construite comme suit :

$$\begin{bmatrix} (1.1.1;1)(1,1,1;1) & (1.03,1.49,2.10;1)(0.92,1.49,1.66;0.9) & (1.35,2.28,3.09;1)(1.98,2.28,2.55;0.9) \\ 0.47,0.66,0.96;1)(0.60,0.66,0.74;0.9) & (1.1.1;1)(1,1,1;1) & (0.84,1.31,1.91;1)(1.15,1.31,1.48;0.9) \\ (0.32,0.43,0.73;1)(0.39,0.43,0.5;0.9) & (0.52,0.76,1.18;1)(0.67,0.76,0.86;0.9) & (1.1.1;1)(1,1,1;1) \end{bmatrix}$$

En utilisant l'équation (2.37), les poids pondérés $\tilde{\tilde{r}}_1$, $\tilde{\tilde{r}}_2$ et $\tilde{\tilde{r}}_3$ pour les trois experts sont calculés comme suit (Daas *et al.*, 2023, b- d).:

$$\tilde{\tilde{r}}_1 = (1,1,1;1)(1.03,1.49,2.10;1)(1.35,2.28,3.09,1))^{1/3}((1,1,1;1)(0.92,1.49,1.66;0.9)(1.98,2.28,2.55;0.9))^{1/3}$$

$$\tilde{\tilde{r}}_1 = ((1.40,3.40,6.49;1)(1.82,3.40,4.26;0.9))^{1/3}$$

$$\tilde{\tilde{r}}_1 = (1.21,1.5,1.86;1)(1.22,1.50,1.62;0.9)$$

$$\tilde{\tilde{r}}_2 = (0.73,0.95,1.22;1)(0.88,0.95,1.03;0.9)$$

$$\tilde{\tilde{r}}_3 = (0.55,0.69,0.95;1)(0.64,0.69,0.75;0.9)$$

En utilisant l'équation (2.38), le poids de chaque expert peut être obtenu comme suit (Daas *et al.*, 2023, b- d):

$$\tilde{\tilde{w}}_1 = (1.21,1.5,1.86;1)(1.22,1.50,1.62;0.9) \otimes \big((1.21,1.5,1.86;1)(1.22,1.50,1.62;0.9)\big) + (0.73,0.95,1.22;1)(0.88,0.95,1.03;0.9) + (0.55,0.69,0.95;1)(0.64,0.69,0.75;0.9))^{-1}$$

$$\tilde{\tilde{w}}_1 = (0.465,0.477,0.461;1)(0.445,0.477,0.475;0.900)$$

$$\tilde{\tilde{w}}_2 = (0.306,0.304,0.303;1)(0.233,0.220,0.222;0.900)$$

$$\tilde{\tilde{w}}_3 = (0.229,0.220,0.237;1)(0.233,0.220,0.222,0.900)$$

L'utilisation de l'approche de l'ensemble flou triangulaire défuzzifié de type 2 (DTriT), l'équation (2.39), le poids de chaque expert est obtenu :

$$DTriT_{\tilde{\tilde{w}}_1} = 0.460,\ DTriT_{\tilde{\tilde{w}}_2} = 0.310,\ DTriT_{\tilde{\tilde{w}}_3} = 0.230.$$

Nous présentons dans ce qui suit une agrégation d'opinions d'experts pour chaque barrière de sécurité d'urgence compte tenu des poids de chacun des experts. Les experts ont exprimé leurs opinions qualitativement pour toutes les barrières de sécurité d'urgence, tel que présenté dans le tableau 4.5. Le tableau 4.6 présente les valeurs de défuzzification du nombre flou trapézoïdal.

TABLEAU 4.5 – Jugements des experts pour les barrières de sécurité d'urgence (Daas *et al.*, 2023, b-d-e).

Description	Opinions d'experts		
	E1	E 2	E3
BS_1 : Détecteur feu/gaz et arrêt d'urgence	M	E	TE
BS_2 : Système automatique.de lutte contre l'incendie	M	RF	M
BS_3 : Plan d'intervention d'urgence	RF	RF	M

A titre d'exemple, le calcul d'agrégation détaillé pour la barrière de sécurité d'urgence "BS_2: système d'extinction automatique d'incendie" est présenté comme suit. L'opinion du premier expert (E1) est moyenne (M) (0,35, 0,45, 0,55, 0,65), pour E_2 est relativement faible (RF) (0,17, 0,20, 0,30, 0,37) et pour E_3 est relativement faible (RF) (0,17, 0,20, 0,30, 0,37). Par conséquent, en utilisant les équations (2.40) et (2.41), la procédure d'agrégation pour le système d'extinction automatique d'incendie "BS_2" est (Daas *et al.*, 2023, d). :

$\tilde{P}_{A(BS_2)} = 0.460 \otimes (0.35, 0.45, 0.50, 0.65) \oplus 0.310 \otimes (0.17,\ 0.30, 0.30, 0.37) \oplus 0.230 \otimes (0.17, 0.30, 0.30, 0.37) = (0.254, 0.317, 0.417, 0.490)$

De plus, la méthode du centre de l'aire a été utilisée pour défuzzifier avec précision les valeurs des probabilités de défaillance floues. Le score de probabilité floue (FPS) des barrières de sécurité peut être converti en probabilité de défaillance floue correspondante à l'aide de l'équation (2.44). Par conséquent, le calcul de la valeur du score de possibilité floue du groupe d'experts pour la barrière de sécurité "BS_2" est obtenu comme (Daas *et al.*, 2023, d). :

$$FPS_{ESB_2} = \frac{1}{3} * \frac{0.548}{0.336} = 0,543.$$

TABLEAU 4.6 – Valeurs de défuzzification du nombre flou trapézoïdal (Daas *et al.*, 2023, d).

Barrière de sécurité d'urgence	C_1	C_2	C_3	C_4
BS_1 : Détecteur feu/gaz et arrêt d'urgence	0.623	0.687	0.758	0.818
BS_2 : Système automatique de lutte contre l'incendie.	0.254	0.317	0.417	0.490
BS_3 : Plan d'intervention d'urgence	0.425	0.485	0.572	0.644

Enfin, selon les équations (2.53) et (2.54) (voir chapitre 2), la probabilité de défaillance floue correspondante du groupe d'experts pour la barrière de sécurité d'urgence "BS_2" est de 9.276E-03 (Daas *et al.*, 2023, d)..

$k = -(0.543 \times 10 - 12) \times 0.5 = 3.283, \quad FFP_{BS_2} = \frac{1}{10^{3.283}} = 3.750E - 03.$

Après les calculs d'agrégation, les probabilités de défaillance floue des barrières de sécurité d'urgence sont présentées dans le tableau 4.7. Selon les résultats, le « système d'extinction

automatique d'incendie » est la barrière de sécurité d'urgence la plus critique, car la valeur de probabilité de défaillance floue est de 3.750E-03. Par conséquent, les barrières de sécurité d'urgence "plan d'intervention d'urgence en cas d'incendie" et "détection d'incendie et arrêt d'urgence" sont classées deuxième et troisième avec des valeurs de probabilité de défaillance floue de 2.865E-03 et 2.081E-03, respectivement.

L'un des principaux objectifs de notre étude est d'identifier la barrière de sécurité d'urgence critique vis-à-vis de l'événement perte de confinement. La figure 4.4 présente une analyse AdE d'urgence où différentes conséquences d'urgence (CU) sont mentionnées en compte tenu du succès des diverses barriéres de sécurité d'urgences. D'autre part, l'AdE d'urgence est conçu pour évaluer les scénarios d'urgence liés au scénario d'accident « feu de nappe ». Il existe quatre situations d'urgence : CU_{11} "incendie local et blessés légers", CU_{12} "incendie pleinement développé et blessés légers", CU_{13} "incendie local et blessés lourds" et CU_{14} "incendie pleinement développé et blessés lourds" (Daas *et al.*, 2023, b- d- e).

TABLEAU 4.7 – Classement de la probabilité de défaillance floue des barrières de sécurité d'urgence (Daas *et al.*, 2023, d).

Barrière de sécurité d'urgence	Score de possibilité de défaillance	Probabilité de défaillance	Classement
BS_1 : Détecteur feu/gaz et arrêt d'urgence	0.540	2.081E-03	3
BS_2 : Système automatique de lutte contre l'incendie.	0.579	3.750E-03	1
BS_3 : Plan d'intervention d'urgence	0.495	2.866E-03	2

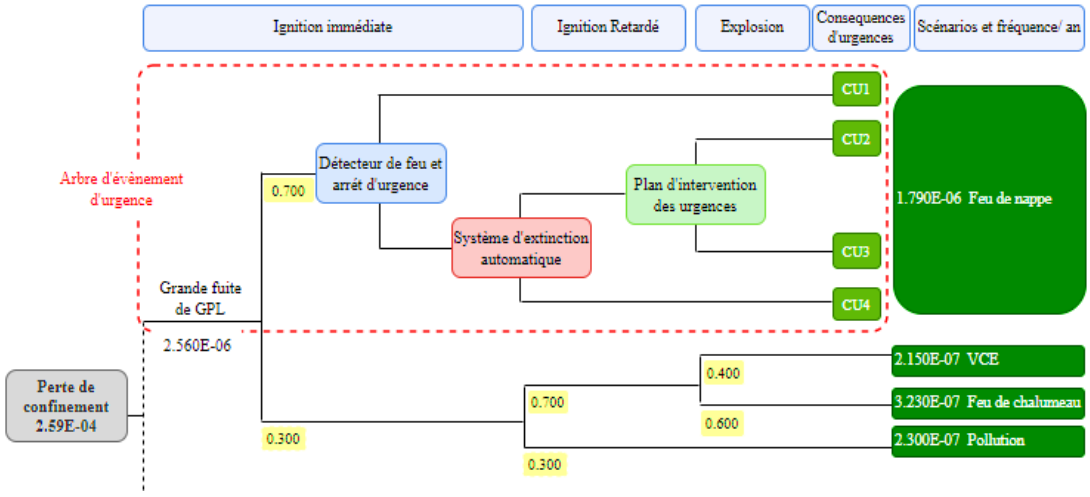


FIGURE 4.6 – Analyse d'arbre des événements d'urgence de la grande fuite de GPL (Daas *et al.*, 2023, b- d- e).

4.5. Evaluation de la disponibilité du système automatique de lutte contre l'incendie

Afin de mettre en œuvre la démarche proposée au chapitre 3, cette section propose une évaluation de la disponibilité du système automatique de lutte l'incendie installé dans la zone de stockage de GPL. Le choix de cette zone de stockage de GPL s'explique par sa position géographique dans une zone proche des autres industries pétrolières et gazières et sa sensibilité à l'économie de notre pays. Pour ces raisons, les systèmes d'extinction automatique d'incendie installés dans ces endroits doivent avoir une fiabilité accrue afin de limiter les dégâts en cas d'accident majeur.

Les systèmes automatique de lutte contre l'incendie est un système complexe. La figure 4.6 montre schématiquement un organigramme de la fonction principale dans ce système automatique de lutte contre l'incendie lié aux sphères de stockage de GPL. Ce système comprend un système de déluge d'eau, un système de réservoir d'eau, un système de pompe et un système logique. Le système de déluge d'eau est activé automatiquement ou manuellement. Via le système de réservoir d'eau, le liquide provenant du puits et de l'extérieur du site est stocké dans deux réservoirs d'une capacité de 15 000 m^3 chacun. En cas de risque d'incendie, le signal va également du panneau central à la vanne du système d'eau, l'ouvrant et établissant un canal d'eau dans le réservoir provoqué par la pression de l'eau. Ce réseau d'eau est intégré au système de filtration pour éviter les problèmes de corrosion dans les conduites d'eau. A cet effet, des produits chimique sont rajouté afin d'éviter le problème de corrosion. Le système de pompage multifonctions inclut deux pompes jockey (2 × 100%), avec un débit de 30 m^3/h et une pression de 9 barg, deux pompes électriques (2 × 50), avec un débit de 550 m^3/h et une pression de 10 barg et des pompes diesel (1x100), avec un débit de 1100 m^3 /h et une pression de 10 barg en mode veille et alimentation en eau de l'anneau à la demande. Afin de distribuer l'eau d'incendie à tous les systèmes de lutte contre l'incendie sur le site, l'anneau principal est constamment pressé à 9 barg par une pompe jockey. En cas de gaz ou d'incendie, les systèmes logiques d'incendie et de gaz envoient un signal aux pompes électriques et à la vanne d'inondation pour qu'elles démarrent. Lorsque la soupape de trop-plein glisse dans le foyer, elle s'ouvre, l'eau s'écoule par les canaux de trop-plein. Pour maintenir le niveau de pression dans l'anneau principal, des dispositifs de pression sont installés dans l'anneau principal.

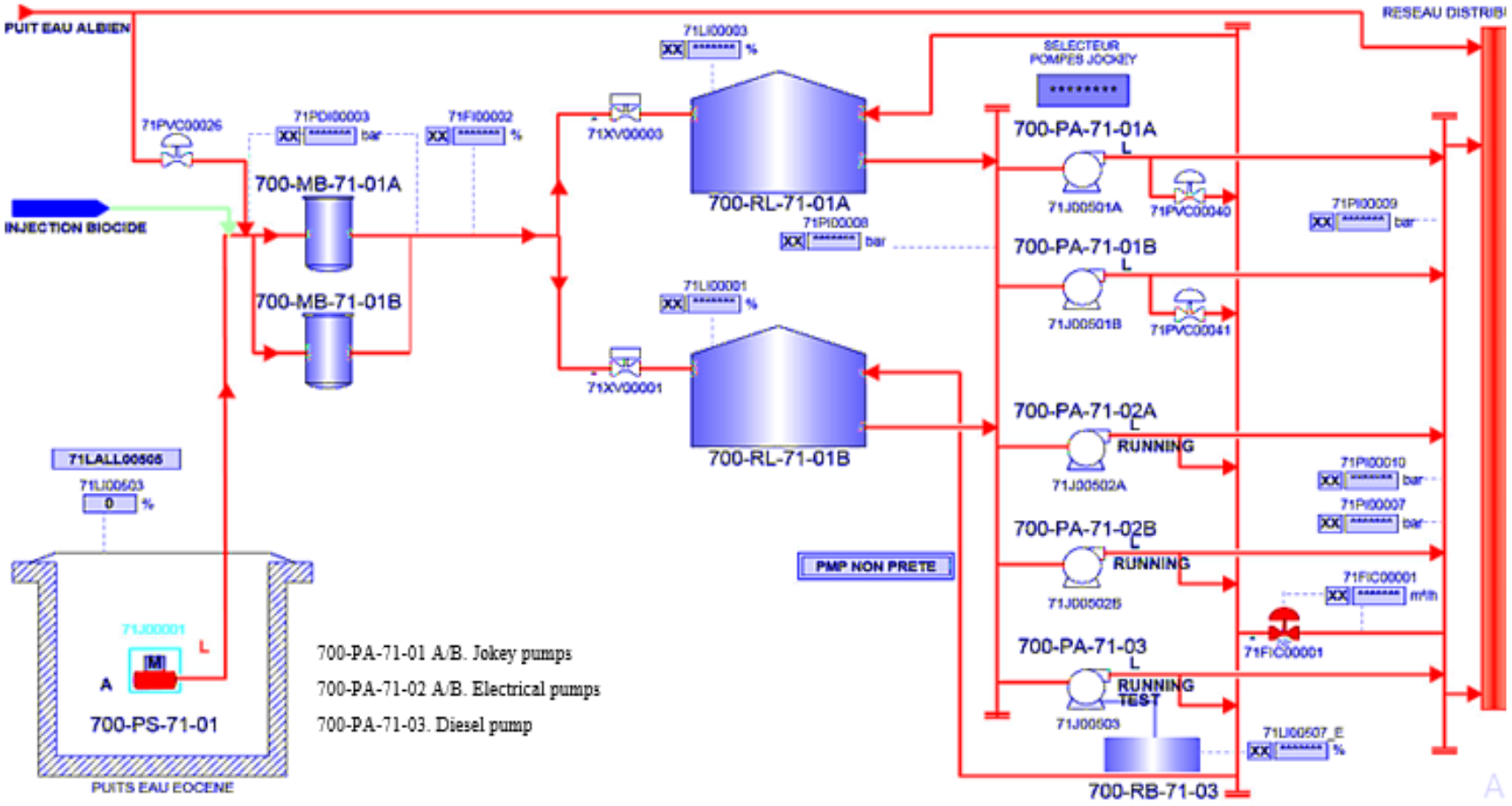


FIGURE 4.7 – Organigramme simplifié du système automatique de lutte contre l'incendie du stockage de GPL.

4.5.1. Analyse dysfonctionnelle de la barrière de sécurité « système automatique de lutte contre l'incendie » par la méthode AMPEC

Une AMPEC de chaque composant du système a été requise pour définir les modes de perturbations des composants. Par la suite, le but de cette analyse dysfonctionnelle est de sélectionner la composante la plus critique du système. La perturbation de cette composante a un impact sur les facteurs de risque : personnel, environnemental, public et sur la production. Un extrait des résultats AMPEC est présenté au tableau 4.8, contenant quelques composants dans le but d'expliquer la démarche d'analyse par la méthode AMPEC.

Dans cette étude, la détermination de la valeur seuil du nombre de priorité du risque (NPR) déclenchant le plan d'action (mesures correctives) a nécessité l'élaboration d'un questionnaire, auquel ont répondu quinze salariés du complexe GPL. Les résultats de ce questionnaire sont présentés à la figure 4.7, qui montre qu'un nombre important de participants (53 %) ont jugés que le seuil du nombre de priorité du risque se situe dans la fourchette de $20 < NPR \leq 80$. Nous définissons donc $NPR = 20$ comme la valeur minimale qui déclenche le plan d'action.

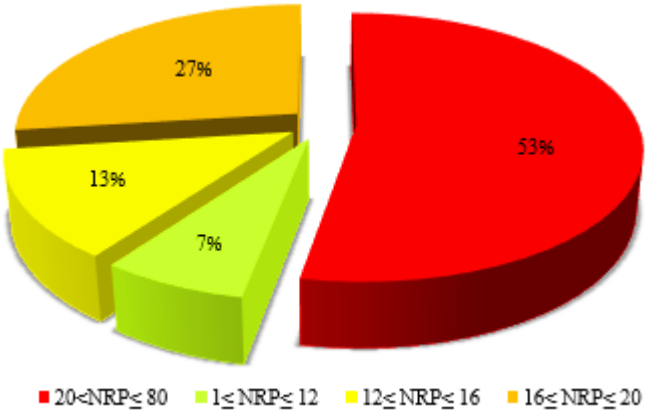


FIGURE 4.8 – Résultats du questionnaire pour la détermination de la valeur seuil de nombre de priorité du risque (NPR) (Daas *et al.*, 2023, c).

D'après les résultats du tableau 4.8, le mode de perturbation "non ouverture à la demande" du composant "vanne déluge" a une valeur NPR de 36, qui appartient à la classe "très élevée" ($20 < NPR \leq 80$). Il est à noter que ce mode de perturbation nécessite la maintenance préventive et des tests réguliers. Il est donc nécessaire de maitriser le mode de perturbation ci-dessus par le déclenchement d'un plan d'actions correctives afin d'améliorer la fiabilité du système en question.

TABLEAU 4.8 – Extrait de l'étude AMPEC du système automatique de lutte contre l'incendie relatif aux sphères de stockage GPL (Daas *et al.*, 2023, c)

Composant	Modes de perturbations	Causes de perturbations	Effets de perturbations	Détection	Criticité			
					F	I	D	NPR
-La vanne déluge.	-La vanne déluge ne s'ouvre pas à la demande.	-Bloquée fermée. -Système électromécanique ne fonctionne pas.	-Pas de passage d'eau.	-Systèmes de détection de feu et de gaz. -Signal du système d'arrêt d'urgence.	3	4	3	36
	-Une grande fuite d'eau.	-Corrosion. -Endommagement des conduites.	-Passage d'eau réduit.	-Inspection et contrôle technique des équipements.	2	3	2	12
-Blocage de la buse.	-Colmatage.	-Calcaire. -Débit d'eau réduit.	-Le rideau d'eau ne protège pas tous les équipements.	-Inspection et contrôle des équipements. -Signal de basse pression d'eau.	2	3	3	18

Afin de calculer l'importance de chacune des quatre catégories de facteurs de risque, concernant l'influence ou l'impact de la perturbation du composant le plus critique sur le bon fonctionnement de la barrière de sécurité d'urgence (système automatique de lutte contre l'incendie), nous avons mis à profit la structure AHP illustré à la figure 4.9. Elle contient l'objectif de l'étude "prioriser les facteurs de risque sur le système de lutte contre l'incendie", les alternatives pour y parvenir (10 actions correctives), et les critères proposés sous forme des facteurs de risque sur le personnel, l'environnement, le public et sur la production (Daas *et al.*, 2023,c).

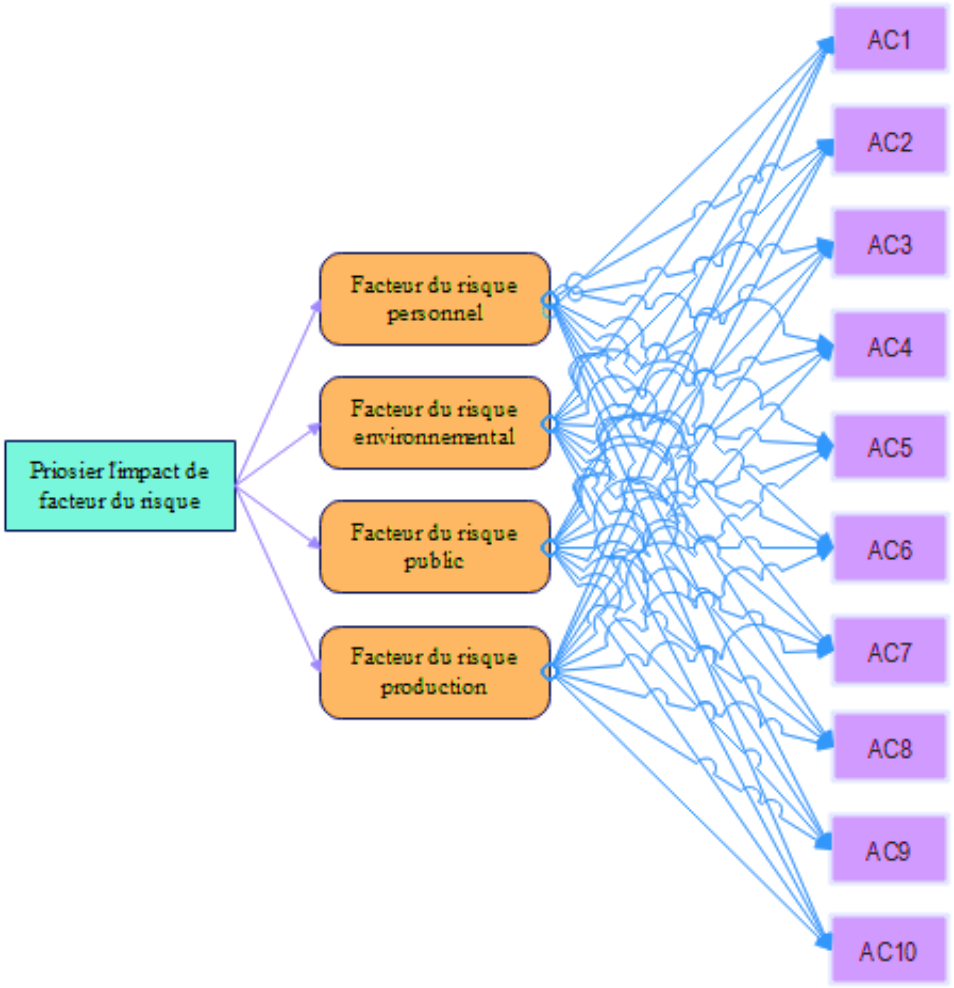


FIGURE 4.9 – Structure hiérarchique du mode de perturbation « échec d'ouverture à la demande » (Daas *et al.*, 2023,c).

Les comparaisons par paires entre tous les facteurs de risque ont été faites en utilisant des données provenant d'ensembles de questionnaires auxquels ont participé trois travailleurs au niveau de l'unité GPL. Les données de comparaison par paires de chaque facteur de risque sont mentionnées dans le tableau 4.9, en termes de nombres flous triangulaires.

TABLEAU 4.9 – Matrice de comparaison entre les facteurs du risque (Daas *et al.*, 2023,c).

	FR_Pers.	FR_Envi.	FR_Pub.	FR_Prod.
FR_Pers.	(1, 1, 1)	(3, 5, 7)	(1, 3,5)	(1, 3, 5)
FR_Envi.	(1/7, 1/5, 1/3)	(1, 1, 1)	(1/3, 1, 1)	(1, 3, 5)
FR_Pub.	(1/3, 1, 1)	(1, 3, 5)	(1, 1, 1)	(1, 3, 5)
FR_Prod.	(1/3, 1, 1)	(1/3, 1, 1)	(1/3, 1, 1)	(1, 1, 1)

En utilisant l'équation (3.2), les moyennes géométriques de la valeur de comparaison floue $\tilde{r}_1$ ont été calculées et groupées dans le tableau 4.10.

TABLEAU 4.10 – Moyennes géométriques des valeurs de comparaison floues (Daas *et al.*, 2023,c)..

Critères	$\tilde{r}_i$		
FR_Pers.	1.316	2.590	3.637
FR_Envi.	0.464	0.880	1.133
FR_Pub.	0.758	1.732	2.236
FR_Prod.	0.435	1.000	1.000
Total	2.973	6.202	8.007
Inverse	0.336	0.161	0.125
Ordre croissant	0.125	0.161	0.336

En utilisant l'équation (3.4), les moyennes géométriques des valeurs floues ont ensuite été converties en valeurs floues relatives de poids comme indiqué dans le tableau 4.11, en les multipliant par le total des moyennes géométriques floues inverses dans l'ordre croissant. Enfin, la procédure de défuzzification consiste à localiser la meilleure valeur de performance non floue (BNP), calculée en utilisant l'équation (3.7). Les résultats sont donnés au tableau 4.11. Ensuite, les dix alternatives ont été comparées sur chaque facteur de risque en utilisant les mêmes étapes précédentes. Pour éviter la répétition, seuls les scores finaux sont indiqué dans le tableau 4.12 ci-dessous (Daas *et al.*, 2023,c).

TABLEAU 4.11 – Poids flous et meilleure performance non floue de chaque critère.

Critères	$\widetilde{W}_i$			BNP	Classement
FR_Pers.	0.165	0.417	1.222	0.444	1
FR_Envi.	0.058	0.142	0.381	0.143	3
FR_Pub.	0.095	0.279	0.751	0.277	2
FR_Prod.	0.054	0.161	0.336	0.136	4

TABLEAU 4.12 – Agrégation des résultats pour chaque alternative en fonction des facteurs du risque (Daas *et al.*, 2023,c).

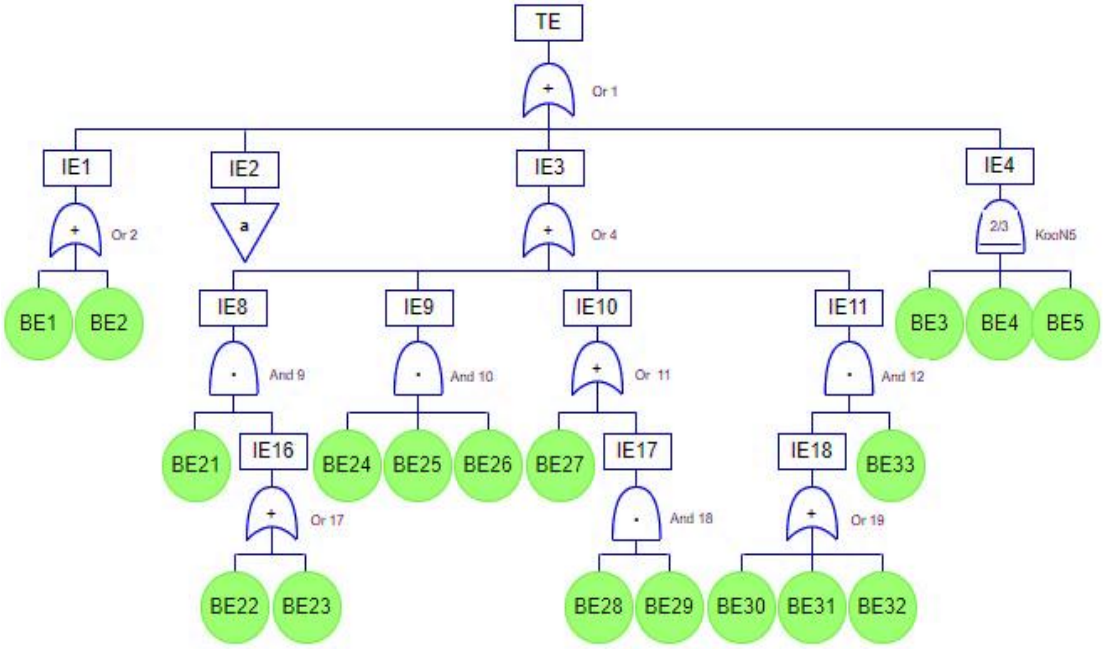
Critères	Scores des alternatives en fonction des facteurs du risque.										
	Poids	AC1	AC2	AC3	AC4	AC5	AC6	AC7	AC8	AC9	AC10
FR_Pers.	0.444	0.128	0.051	0.040	0.155	0.076	0.108	0.092	0.049	0.129	0.172
FR_Envi.	0.143	0.119	0.053	0.068	0.151	0.065	0.137	0.094	0.053	0.128	0.130
FR_Pub.	0.277	0.118	0.049	0.071	0.161	0.065	0.116	0.093	0.056	0.127	0.143
FR_Prod.	0.136	0.122	0.057	0.065	0.155	0.058	0.122	0.091	0.057	0.138	0.133
Total (score des alternatives * poids des facteurs de risque)		0.123	0.052	0.056	0.156	0.069	0.116	0.092	0.053	0.130	0.153

4.5.2. Développement de l'arbre des défaillances

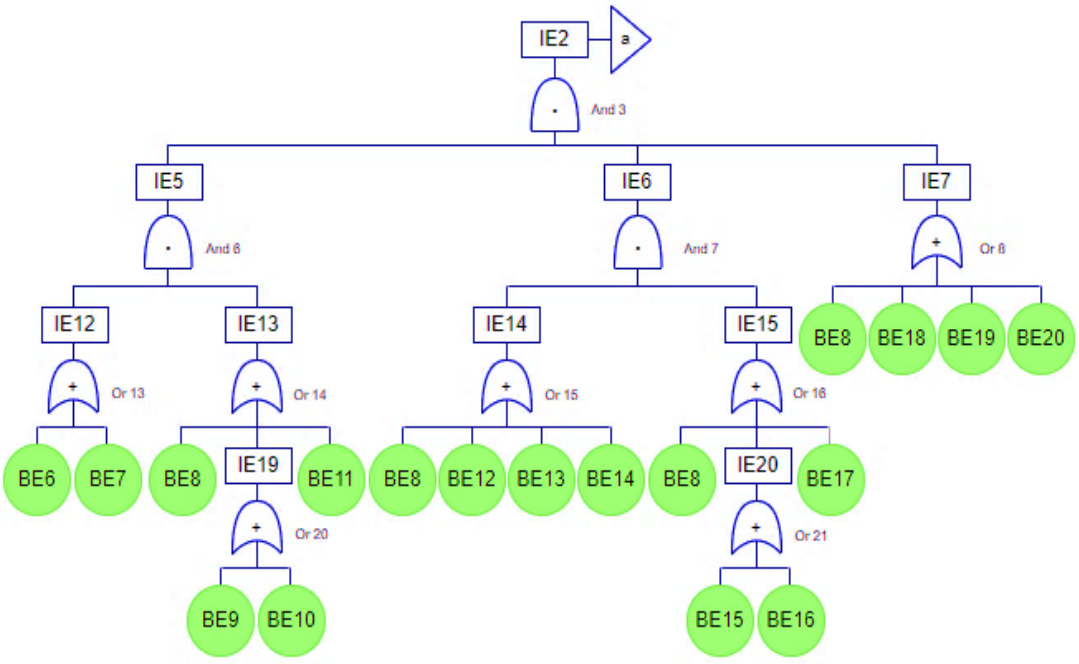
L'analyse par arbre des défaillances (AdD) est appliquée au système d'extinction automatique d'incendie. L'AdD a été développé après avoir compris d'une manière approfondie le fonctionnement du système considéré. L'AdD obtenu est présenté à la figure 4.9. Il se compose de quatre sous-systèmes majeurs (événements intermédiaires (EI)) : défaillance du système déluge (EI1), défaillance du système de pompage (EI2), défaillance du système de réservoir (EI3), défaillance du système logique (EI4). Ces événements intermédiaires contribuent directement à l'événement sommet « défaillance du système automatique de lutte contre l'incendie » et sont reliés donc entre eux par une porte « OU ». Au total, 33 événements de base composent cet AdD, qui sont répertoriés dans le tableau 4.13. Un premier traitement de cet AdD a révélé l'existence de 417 coupes minimales (Daas *et al.*, 2023, a- d).

4.5.2.1. Evaluation des probabilités des événements de base

Dans cette étude, un groupe de quatre experts a été formé pour estimer la probabilité de défaillance des événements de base. Le degré de variation des variables linguistiques est donné aux tableaux 3.6 et 3.7. Le processus d'agrégation a été effectué avec 33 données quantitatives relatives aux 33 évènements de base, découlant des quatre experts. Des pondérations attribuées par des experts d'horizons différents ont été utilisées pour combiner différentes opinions. Les estimations d'experts des probabilités des événements de base sont présentées dans le tableau 4.14 (Daas *et al.*, 2023, a- d).



(**a**)



(**b**)

FIGURE 4.10 – AdD relatif au système automatique de lutte contre l'incendie (Daas *et al.*, 2023, a-d)

TABLEAU 4.13 – Description des événements de base, intermédiaires et de l'événement sommet (Daas *et al.*, 2023, a-d).

EB	Description	EB	Description
EB1	La vanne déluge ne s'ouvre pas sur demande	EB15	Défaillance des pompes électriques 1, 2.
EB2	Blocage de la buse de pulvérisation	EB16	Défaillance du moteur électrique 4
EB3	Défaillance du détecteur de flamme 1	EB17	La pompe électrique 2 ne démarre pas à la demande
EB4	Défaillance du détecteur de flamme 2	EB18	Défaillance de la pompe à gasoil
EB5	Défaillance du détecteur de flamme 3	EB19	La pompe diesel ne démarre pas à la demande
EB6	Défaillance de la pompe jokey A	EB20	Défaillance du moteur diesel
EB7	Défaillance du moteur électrique 1	EB21	Rupture du réservoir A
EB8	Défaillance du capteur de pression	EB22	Fuite de vanne manuelle en position fermée
EB9	Défaillance de la pompe jokey B	EB23	Erreur humaine
EB10	Défaillance du moteur électrique 2	EB24	Défaillance du filtre A
EB11	La pompe Jockey B ne démarre pas à la demande	EB25	Défaillance du filtre B
EB12	Défaillance de la pompe jokey A/B	EB26	Fuite de vanne à soupape 1
EB13	Défaillance du moteur électrique 3	EB27	Défaillance du capteur de niveau
EB14	La pompe électrique A ne démarre pas sur demande	EB28	La vanne automatique 2 ne s'ouvre pas

TABLEAU 4.13 (suite)– Description des événements de base, intermédiaires et de l'événement sommet (Daas *et al.*, 2023, a-d).

EB	Description	EB	Description
EB29	Fuite de vanne à soupape 2.	EI8	Pas d'eau du réservoir
EB30	Défaillance de la pompe du puit	EI9	Défaillance du système de filtrage
EB31	Défaillance du moteur électrique 5	EI10	Faible niveau d'eau dans les réservoirs
EB32	La pompe du puits ne démarre pas à la demande	EI11	Pas d'eau du puit
EB33	La vanne automatique 1 ne s'ouvre pas	EI12	Défaillance du système de pompe Jockey A
ES	Défaillance des systèmes automatiques d'incendie	EI13	Défaillance de la pompe Jockey B
EI1	Défaillance du système déluge	EI14	Défaillance du système de pompe électrique A
EI2	Défaillance du système de pompe	EI15	Défaillance du système de pompe électrique B
EI3	Défaillance dans le système de réservoirs	EI16	Défaillance du système de pompe du puits
EI4	Défaillance dans le système logique	EI17	Réservoir B inutilisé
EI5	Défaillance du système de pompe Jockey	EI18	Défaillance d'un système de vanne automatique
EI6	Défaillance du système de pompe électrique	EI19	Défaillance de la pompe jockey 2
EI7	Défaillance du système de pompe diesel	EI20	Défaillance de la pompe électrique 2

TABLEAU 4.14 – Jugements et opinions des experts concernant les probabilités des événements de base (Daas *et al.*, 2023, a- d).

EB	Opinions des experts (E)				EB	Opinions des experts			
	E1	E2	E3	E4		E1	E2	E3	E4
EB1	M	RE	RF	M	EB18	F	RF	RF	M
EB2	F	TF	M	RF	EB19	RF	RF	M	RE
EB3	M	E	TE	RE	EB20	E	RE	H	RF
EB4	RE	RE	E	RE	EB21	RF	L	RF	F
EB5	RE	TE	RE	E	EB22	E	H	TE	TE
EB6	E	TE	TE	E	EB23	TE	M	RE	M
EB7	RE	RE	E	E	EB24	E	RE	E	TE
EB8	RE	E	RE	TE	EB25	E	RE	E	TE
EB9	E	TE	TE	E	EB26	E	TE	RE	E
EB10	RE	RE	E	E	EB27	TE	E	E	E
EB11	RF	M	M	F	EB28	RE	TE	RF	RE
EB12	TE	E	TE	E	EB29	E	TE	RE	E
EB13	RE	RE	E	E	EB30	E	TE	RE	TE
EB14	M	RF	M	M	EB31	F	M	M	RF
EB15	FR	RF	M	TF	EB32	M	F	RE	M
EB16	RE	RE	E	E	EB33	TE	M	RE	M
EB17	M	RF	M	M					

A titre d'exemple, la procédure d'agrégation utilisant l'agrégation moyenne pondérée ordonnée floue de l'événement de base ("EB_1" : échec de l'ouverture de la vanne déluge à la demande) est présentée dans le tableau 4.15 (Daas *et al.*, 2023, c). Les termes linguistiques donnés par le groupe d'experts sont moyenne $(0{,}35, 0{,}45, 0{,}55, 0{,}65)$, relativement élevés $(0{,}62, 0{,}70, 0{,}75, 0{,}82)$, relativement faibles $(0.17, 0.20, 0.30, 0.37)$ et moyenne $(0{,}35, 0{,}45, 0{,}55\ , 0{,}65)$. Selon l'équation (3.12), la valeur moyenne arithmétique du groupe d'experts est $\tilde{R}_a = (0.372, 0.450, 0.537, 0.622)$. Selon l'équation (3.13), les valeurs de distance entre le groupe d'experts sont $d(\tilde{R}_1, \tilde{R}_a) = 0.009$, $d(\tilde{R}_2, \tilde{R}_a) = 0.128$, $d(\tilde{R}_3, \tilde{R}_a) = 0.109$ et $d(\tilde{R}_4, \tilde{R}_a) = 0.009$ (Daas *et al.*, 2023, d).

Les valeurs de similarité du groupe d'experts, obtenues selon l'équation (3.14), sont : $s(\tilde{R}_1, \tilde{R}_a) = 0.963$, $s(\tilde{R}_2, \tilde{R}_a) = 0.500$, $s(\tilde{R}_3, \tilde{R}_a) = 0.573$ et $s(\tilde{R}_4, \tilde{R}_a) = 0.963$. De plus, les valeurs des poids liés aux experts, voir l'équation (3.15), sont $\omega_1 = 0.321$, $\omega_2 = 0.167$, $\omega_3 = 0.191$ et $\omega_4 = 0.321$. Compte tenu des équations (3.16) et (3.17), les valeurs

finales d'agrégation du groupe d'experts (agrégation moyenne pondérée ordonnée floue) sont :

$$\begin{cases} \tilde{\mathrm{R}}_1 = (0.112, 0.145, 0.177, 0.209) \\ \tilde{\mathrm{R}}_2 = (0.103, 0.117, 0.125, 0.137) \\ \tilde{\mathrm{R}}_3 = (0.032, 0.038, 0.057, 0.067) \\ \tilde{\mathrm{R}}_4 = (0.112, 0.145, 0.177, 0.209) \end{cases}$$

TABLEAU 4.15 – Les calculs d'agrégations pour l'événement de base"BE_1" ((Daas *et al.*, 2023, d)

EB_1		Opinions des experts		Valeurs flous			
Groupe d'experts							
Expert 1		Moyenne		0.350	0.450	0.550	0.650
Expert 2		Relativement élevée		0.620	0.700	0.750	0.820
Expert 3		Relativement faible		0.170	0.200	0.300	0.370
Expert 4		Moyenne		0.350	0.450	0.550	0.650
$d(\tilde{R}_1, \tilde{R}_a)$	0.009	Moyenne arithmétique $\tilde{R}_a$		0.372	0.450	0.537	0.622
$d(\tilde{R}_2, \tilde{R}_a)$	0.128	Agrégation moyenne pondérée ordonnée floue					
$d(\tilde{R}_3, \tilde{R}_a)$	0.109		$\tilde{\mathrm{R}}_1$	0.112	0.145	0.177	0.209
$d(\tilde{R}_4, \tilde{R}_a)$	0.009		$\tilde{\mathrm{R}}_2$	0.103	0.117	0.125	0.137
$s(\tilde{R}_1, \tilde{R}_a)$	0.963		$\tilde{\mathrm{R}}_3$	0.032	0.0.38	0.057	0.067
$s(\tilde{R}_2, \tilde{R}_a)$	0.500		$\tilde{\mathrm{R}}_4$	0.112	0.145	0.177	0.209
$s(\tilde{R}_3, \tilde{R}_a)$	0.573	Nombre flou trapézoïdal $\tilde{C}$		c_1	c_2	c_3	c_4
$s(\tilde{R}_4, \tilde{R}_a)$	0.963			0.361	0.444	0.536	0.621
ω_1	0.321						
ω_2	0.167						
ω_3	0.191						
ω_4	0.321						

Selon l'équation (2.44), le nombre trapézoïdal flou de l'événement de base"BE_1", $\tilde{C}_{EB_1} = (0.361, 0.444, 0.536, 0.621)$ doit être converti en une possibilité de défaillance nette (*CFP*). La possibilité de défaillance nette des événements de base peut être transformée en probabilité de défaillance correspondante en utilisant les équations (3.16). Donc, le calcul de la valeur de possibilité de défaillance nette du groupe d'experts pour l'événement de base "BE_1" conduit à une valeur de 0,503. Enfin, selon les équations (3.19) et (3.20), la probabilité de défaillance correspondante du groupe d'experts pour l'événement de base "BE_1" est de 4.200E-03.

Après les calculs d'agrégation, les résultats obtenus pour tous les événements de base par le nombre trapézoïdal sont présentés dans le tableau 4.16. Le tableau 4.17, représente les résultats de probabilité de défaillance de tous les évènements de base à l'aide de nombre floue triangulaire.

TABLEAU 4.16 – Possibilités de défaillances nettes et probabilités de défaillances calculées par le nombre flou trapézoïdal (Daas *et al.*, 2023, d)..

BE	Groupe d'experts		BE	Groupe d'experts	
	Possibilité nette de défaillance	Probabilité de défaillance		Possibilité nette de défaillance	Probabilité de défaillance
EB1	0.5033	4.20E-03	EB18	0.5803	9.80E-03
EB2	0.5922	1.09E-02	EB19	0.5325	5.97E-03
EB3	0.4061	9.14E-04	EB20	0.4319	1.46E-03
EB4	0.4144	1.07E-03	EB21	0.5907	1.08E-02
EB5	0.3938	7.14E-04	EB22	0.3623	3.51E-04
EB6	0.3661	3.85E-04	EB23	0.4501	1.98E-03
EB7	0.4004	8.16E-04	EB24	0.3864	6.10E-04
EB8	0.3959	7.46E-04	EB25	0.3864	6.10E-04
EB9	0.3623	3.51E-04	EB26	0.3751	4.75E-04
EB10	0.4004	8.16E-04	EB27	0.3711	4.33E-04
EB11	0.5511	7.32E-03	EB28	0.4343	1.52E-03
EB12	0.3623	3.51E-04	EB29	0.3751	4.75E-04
EB13	0.4004	8.16E-04	EB30	0.3689	4.11E-04
EB14	0.5136	4.78E-03	EB31	0.5495	7.19E-03
EB15	0.5807	9.84E-03	EB32	0.5042	4.25E-03
EB16	0.4004	8.16E-04	EB33	0.4480	1.91E-03
EB17	0.5136	4.78E-03			

TABLEAU 4.17 – Possibilités de défaillances nettes et probabilités de défaillances calculées par le nombre flou triangulaire (Daas *et al.*, 2023-a)..

BE	Groupe d'experts		BE	Groupe d'experts	
	Possibilité nette de défaillance	Probabilité de défaillance		Possibilité nette de défaillance	Probabilité de défaillance
EB1	4.994E-01	4.005E-03	EB18	2.799E-01	2.593E-05
EB2	2.226E-01	1.348E-06	EB19	4.287E-01	1.386E-03
EB3	7.748E-01	3.934E-02	EB20	7.235E-01	2.932E-02
EB4	7.478E-01	3.386E-02	EB21	2.000E-01	2.650E-07
EB5	8.156E-01	4.840E-02	EB22	9.150E-01	7.421E-02
EB6	6.131E-01	7.421E-02	EB23	6.572E-01	1.874E-02
EB7	7.748E-01	4.407E-02	EB24	7.628E-01	6.027E-02
EB8	7.245E-01	4.840E-02	EB25	7.628E-01	6.027E-02
EB9	6.423E-01	7.421E-02	EB26	8.156E-01	6.027E-02
EB10	7.152E-01	4.407E-02	EB27	8.303E-01	6.589E-02
EB11	3.554E-01	2.964E-04	EB28	6.979E-01	2.492E-02
EB12	9.150E-01	7.421E-02	EB29	8.156E-01	6.027E-02
EB13	7.152E-01	4.407E-02	EB30	8.893E-01	6.706E-02
EB14	4.617E-01	2.367E-03	EB31	3.554E-01	2.964E-04
EB15	2.700E-01	1.700E-05	EB32	4.837E-01	3.252E-03
EB16	7.152E-01	4.407E-02	EB33	6.572E-01	1.874E-02
EB17	4.994E-01	2.367E-03			

4.5.2.2. Evaluation de la probabilité de l'événement sommet

Le logiciel GRIF (GRIF, 2022) a été utilisé pour effectuer les différents calculs : coupes minimales et les différentes probabilités. Les probabilités des différents événements intermédiaires liés aux portes logiques de l'AdD sont regroupées au tableau 4.18. Notons que la probabilité de défaillance du système d'extinction automatique est de 1.550E-02.

TABLEAU 4.18– Valeurs de probabilité de défaillance des portes logiques.

Porte logique	Description	Probabilité de défaillance
Ou1	Défaillance du système automatique d'incendie	1.550E-02
Ou2	Défaillance du système déluge	4.007E-03
Et3	Défaillance du système de pompe	6.541E-04
Et4	Défaillance dans le système de réservoirs	6.873E-02
KooN5	Défaillance dans le système logique	4.746E-03
Et6	Défaillance du système de pompe Jockey	1.818E-02
Et7	Défaillance du système de pompe électrique	1.083E-02
Ou8	Défaillance du système de pompe diesel	7.761E-02
Et9	Pas d'eau du réservoir	2.426E-08
Et10	Défaillance du système de filtrage	2.189E-04
Ou11	Faible niveau d'eau dans les réservoirs	6.730E-02
Et12	Pas d'eau du puit	1.318E-03
Ou13	Défaillance du système de pompe Jockey A	1.150E-01
Ou14	Défaillance de la pompe Jockey B	1.581E-01
Ou15	Défaillance du système de pompe électrique	1.171E-01
Ou16	Défaillance du système de pompe électrique B	9.251E-02
Ou17	Défaillance du système de pompe du puits	7.037E-02
Et18	Réservoir B inutilisé	9.156E-02
Ou19	Défaillance d'un système de vanne automatique	1.502E-03
Ou20	Défaillance de la pompe jockey 2	1.150E-01
Ou21	Défaillance de la pompe électrique 2	4.409E-02

4.6. Analyse de sensibilité

Dans cette étude, la mesure de réduction de risque (RRW) a été calculée à l'aide de l'équation fournie au tableau 3.8 pour l'analyse de sensibilité de l'événement sommet par rapport aux événements de base. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau 4.19. Selon ce tableau, les cinq événements de base les plus critiques sont : EB2 (*Blocage de la buse de pulvérisation*), EB21 (*Rupture du réservoir A*), EB15 (*Défaillance des pompes électriques 1, 2*), EB18 (*Défaillance de la pompe à gasoil*) et EB 11 (*La pompe Jockey B ne démarre pas à la demande*). Cela implique que des actions correctives doivent être effectuées sur les événements de base possédant les RRW les plus élevés.

TABLEAU 4.19 – Classement des événements de base selon le facteur d'importance RRW (Daas *et al.*, 2023, d).

EBs	RRW	Classement	EBs	RRW	Classement
EB1	4.20E-03	10	EB18	9.80E-03	4
EB2	1.09E-02	1	EB19	5.97E-03	7
EB3	9.14E-04	16	EB20	1.46E-03	14
EB4	1.07E-03	15	EB21	1.08E-02	2
EB5	7.14E-04	19	EB22	3.51E-04	25
EB6	3.85E-04	24	EB23	1.98E-03	11
EB7	8.16E-04	17	EB24	6.10E-04	20
EB8	7.46E-04	18	EB25	6.10E-04	20
EB9	3.51E-04	25	EB26	4.75E-04	21
EB10	8.16E-04	17	EB27	4.33E-04	22
EB11	7.32E-03	5	EB28	1.52E-03	13
EB12	3.51E-04	25	EB29	4.75E-04	21
EB13	8.16E-04	17	EB30	4.11E-04	23
EB14	4.78E-03	8	EB31	7.19E-03	6
EB15	9.84E-03	3	EB32	4.25E-03	9
EB16	8.16E-04	17	EB33	1.91E-03	12
EB17	4.78E-03	8			

4.7. Optimisation de la fiabilité de la barrière de sécurité d'urgence : extinction automatique d'incendie

Comme nous l'avons déjà mentionné, selon les résultats obtenus après évaluation de la sensibilité, l'événement de base le plus critique est "EB_2: Blocage du jet de buse", avec une valeur de RRW =1.09E-02. A cet effet, des actions correctives sont proposées pour diminuer la probabilité de cet événement de base et donc améliorer la fiabilité du jet de bus. Le tableau 4.20 présente une liste d'actions correctives potentielles (Daas *et al.*, 2023, d).

TABLEAU 4.20 – Actions correctives potentielles proposées (Daas et al., 2023, d-e).

Actions correctives	Description
AC.1	Nettoyez régulièrement la buse de pulvérisation
AC.2	Traiter la corrosion des tuyaux
AC.3	Améliorer le processus d'observation
AC.4	Appliquer des tests de maintenance cycliques
AC.5	Changer le matériel défectueux
AC.6	Mise à jour de la procédure d'analyse des défaillances
AC.7	Augmenter le nombre de visites sur le site
AC.8	Augmenter le nombre des inspections
AC.9	Mise en œuvre de la maintenance basée sur les risques
AC.10	Réviser et améliorer les procédures et instructions de travail

Dans cette étape, quatre experts ont été mobilisés pour classer au mieux les actions correctives sur l'événement de base critique par rapport à leur efficacité. L'exemple suivant montre la mise en œuvre de la méthode développée au chapitre précédent pour la description du score de sécurité obtenu lié à "AC_1" sur l'événement de base critique "EB2 : Blocage de pulvérisation de buse" (Daas *et al.*, 2023, d-e).

L'expression de sécurité pour le premier expert en utilisant des variables linguistiques "faible", "moyenne", "bien" et "excellent", sont $\mu_{S_{Faible}} = (0,0,1,0.3,0,0,0)$, $\mu_{S_{Moyenne}} = (0,0,0.6,0.5,0.3,0,0)$, $\mu_{S_{Bien}} = (0,0,0.4,0,0,0,0)$ et $\mu_{S_{excellent}} = (0,0,1,0,0.25,0,0)$. La distance entre la description identifiée S_{Faible}, $S_{Moyenne}$, S_{Bien} et $S_{excellent}$ peut être calculée par les équations (3.23), (3.24), (3.25) et (3.26). Ainsi, les valeurs de distance sont respectivement $d_{11}(S_1, Faible) = 1.044$, $d_{12}(S_1, Moyenne) = 0.836$, $d_{13}(S_1, Bien) = 0.400$ et $d_{14}(S_i, excellent) = 1.030$. Selon l'équation (3.27), les valeurs des α_{1j} du premier expert sont respectivement : $\alpha_{11} = 1$, $\alpha_{12} = 0.801$, $\alpha_{13} = 0.383$ et $\alpha_{14} = 0.987$.

Selon l'équation (3.28), les valeurs des β_{1j} du premier expert sont respectivement : $\beta_{11} = 0.315$, $\beta_{12} = 0.253$, $\beta_{13} = 0.121$ et $\beta_{14} = 0.311$. Les valeurs moyennes pondérées du score d'agrégation sont obtenues selon l'équation (3.29) : $AS_{Faible} = 0.248$, $AS_{Moyenne} = 0.273$, $AS_{Bien} = 0.189$ et $AS_{excellent} = 0.268$. Une telle évaluation de "AC_1: nettoyer régulièrement la buse de pulvérisation" peut se résumer par ainsi :

$$\left(S_{AC_1}\right) = \{(0.248,\ faible), (0.273, moyenne), (0.189, bien), (0.268, excellent)\}.$$

Le tableau 4.21 présente les scores de sécurité des différentes actions correctives.

TABLEAU 4.21 – Valeurs du score de sécurité des actions correctives (ACs) (Daas et al., 2023, d).

ACs	Score de sécurité	Classement	ACs	Score de sécurité	Classement
AC.1	0.268	9	AC.6	0.276	6
AC.2	0.279	4	AC.7	0.277	7
AC.3	0.261	10	AC.8	0.274	8
AC.4	0.287	1	AC.9	0.278	5
AC.5	0.284	2	AC.10	0.283	3

4.8. Conclusion

Ce chapitre était consacré à l'illustration de notre méthodologie proposée aux niveaux du deuxième et troisième chapitres par une étude de cas au niveau d'une unité GPL, afin de testé sa faisabilité et donc sa validé. En effet, les résultats de l'étude HAZOP ont permis de sélectionner l'événement initiateur "*grande fuite de GPL*" et trois barrières de sécurité d'urgence selon l'arbre des événements, qui assurent la prévention et la maîtrise des risques liés au stockage de GPL. Il est important d'évaluer la fiabilité de ces trois barrières de sécurité d'urgence. Dans ce cas, la probabilité de défaillance floue des barrières de sécurité d'urgence a été évaluée pour déterminer les barrières les moins fiables. Ainsi, le système d'extinction automatique d'incendie était déterminé comme la barrière la plus critique en termes de probabilité de défaillance. Par conséquent, une évaluation de sa disponibilité a été réalisée à l'aide des arbres de défaillances afin de déterminé les composants le plus critiques. Les résultats ont montré que l'événement de base "EB_2: *Blocage du jet de buse*" est le plus critique. Des actions correctives ont été proposées afin d'améliorer la fiabilité du système automatique de lutte contre l'incendie. Plus de résultats concernant cette étude seront détaillés dans le cinquième chapitre.

Chapitre 5

Discussion des résultats

5.1. Introduction

Pour valider les différentes propositions d'ordre méthodologique fournies dans le cadre de ce travail doctoral, une étude de cas a été menée au niveau de l'unité GPL précédemment citée. Plus précisément, nous allons d'abord présenter les résultats concernant l'évaluation de la probabilité de de défaillance floue des barrières de sécurité. Ensuite, nous présentons les résultats liés à l'évaluation de la fréquence d'occurrence d'un scénario d'accident "feu de nappe" à l'aide d'un arbre d'événements d'urgence. Puis nous abordons les résultats liés à la hiérarchisation des facteurs de risque associés à la perturbation du système automatique de lutte contre l'incendie et les résultats de l'évaluation de la disponibilité de cette barrière de sécurité d'urgence à l'aide des AdD. Enfin, nous allons présenter les résultats de l'optimisation de la fiabilité du système automatique de lutte contre l'incendie au regard des actions correctives considérées.

5.2. Présentation et discussions des résultats relatifs aux probabilités de défaillance floue des barrières de sécurité

L'identification des barrières de sécurité d'urgence et l'évaluation de leurs probabilités de défaillance est l'une des étapes de l'évaluation quantitative des risques (QRA). Cependant, cette quantification des probabilités de défaillance des barrières de sécurité d'urgence est parfois difficile à réaliser du fait de manque de données et l'incertitude.

La probabilité de défaillance floue de la barrière de sécurité d'urgence est utilisée pour calculer la fréquence d'occurrence des conséquences d'urgences liées au scénario feu de nappe. Par conséquent, afin de gérer les incertitudes dans l'analyse par arbre des événements d'urgence, une combinaison d'ensembles flous de type 2 et la méthode AHP a été proposée pour évaluer la probabilité de défaillance floue des barrières de sécurité d'urgence (voir chapitre 2). Egalement, la hiérarchisation des facteurs du risque lié à la perturbation du système de lutte contre l'incendie a été établie. La barrière de sécurité d'urgence la plus critique est sélectionnée et l'évaluation de la fiabilité de cette barrière est conduite (via l'AdD). Les événements de base critiques sont identifiés à l'aide de la mesure d'importance de Fussell-Vesely et le facteur de réduction de risque (RRW). Pour sélectionner l'action corrective la plus efficace et optimiser la fiabilité de la barrière de sécurité d'urgence, une analyse de sécurité subjective basée sur la théorie du raisonnement probant est effectuée.

Les tableaux 5.1 et 5.2, présentent les valeurs de probabilités de défaillances floues des barrières de sécurité d'urgences obtenues selon les équations (2.53) et (2.54) (voir chapitre 2) et à l'aide du nombre floue triangulaire et trapézoïdal (Daas *et al.*, 2023, b-d-e). Les tableaux 5.3 et 5.4 présentent les valeurs de probabilités de défaillances des barrières de sécurité d'urgences obtenues selon les équations (2.55) et (2.56) (voir chapitre 2) et à l'aide du nombre flou triangulaire et trapézoïdal. Le tableau 5.5 présente les valeurs de probabilités de défaillance flou des barrières de sécurité d'urgences obtenues selon les équations (2.45), (2.53) et (2.54) (voir chapitre 2) et à l'aide du nombre flou intuitionniste triangulaire. Le tableau 5.6 présente les valeurs de probabilités de défaillances des barrières de sécurité d'urgences obtenues selon les équations (2.45), (2.55) et (2.56) (voir chapitre 2) et à l'aide

du nombre flou intuitionniste triangulaire. A partir de ses résultats obtenus, la barrière de sécurité d'urgence la plus critique est le « système de lutte contre l'incendie automatique », avec des valeurs plus élevées.

TABLEAU 5.1– Comparaison des valeurs de probabilité de défaillance floue des barrières de sécurité d'urgence par le nombre flou triangulaire.

Barrière de sécurité d'urgence	AHP	AHP floue type 1	AHP floue type 2
BS_1 : Détecteur feu/gaz et arrêt d'urgence	2.220E-03	2.110E-03	2.105E-03
BS_2 : Système automatique de lutte contre l'incendie.	8.420E-03	8.140E-03	9.039E-03
BS_3 : Plan d'intervention d'urgence	3.120E-03	3.320E-03	3.384E-03

TABLEAU 5.2– Comparaison des valeurs de probabilité de défaillance floue des barrières de sécurité d'urgence par le nombre flou trapézoïdal (Daas *et al.*, 2023, d).

Barrière de sécurité d'urgence	AHP	AHP floue type 1	AHP floue type 2
BS_1 : Détecteur feu/gaz et arrêt d'urgence	2.137E-03	2.096E-03	2.081E-03
BS_2 : Système automatique de lutte contre l'incendie.	3.696E-03	3.758E-03	3.750E-03
BS_3 : Plan d'intervention d'urgence	2.811E-03	2.888E-03	2.865E-03

TABLEAU 5.3– Comparaison des valeurs de probabilité de défaillance des barrières de sécurité d'urgence par le nombre flou triangulaire (Daas *et al.*, 2023, b).

Barrière de sécurité d'urgence	AHP	AHP floue type 1	AHP floue type 2
BS_1 : Détecteur feu/gaz et arrêt d'urgence	1.65E-03	2.555E-03	1.493E-03
BS_2 : Système automatique de lutte contre l'incendie.	2.61E-02	3.356E-02	2.949E-02
BS_3 : Plan d'intervention d'urgence	4.37E-03	8.507E-03	5.258E-03

TABLEAU 5.4– Comparaison des valeurs de probabilité de défaillance des barrières de sécurité d'urgence par le nombre flou trapézoïdal (Daas *et al.*, 2023, b).

Barrière de sécurité d'urgence	AHP	AHP floue type 1	AHP floue type 2
BS_1 : Détecteur feu/gaz et arrêt d'urgence	1.312E-03	1.346E-03	5.238E-03
BS_2 : Système automatique de lutte contre l'incendie.	6.734E-02	6.708E-02	1.441E-02
BS_3 : Plan d'intervention d'urgence	3.515E-03	3.586E-03	3.958E-03

TABLEAU 5.5– Comparaison des valeurs de probabilité de défaillance flou des barrières de sécurité d'urgence par le nombre flou intuitionniste triangulaire.

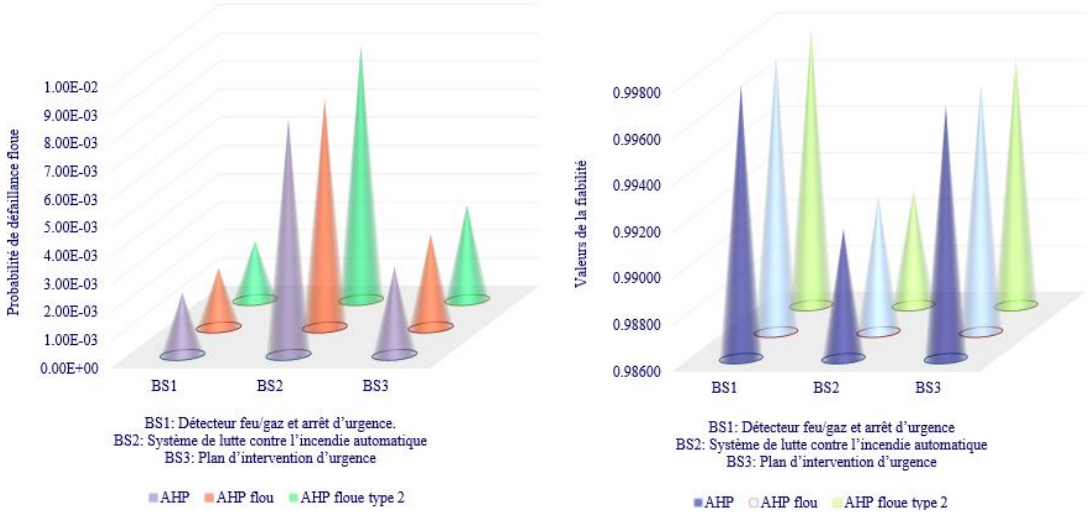
Barrière de sécurité d'urgence	AHP	AHP floue type 1	AHP floue type 2
BS_1 : Détecteur feu/gaz et arrêt d'urgence	6.788E-03	6.754E-03	6.754E-03
BS_2 : Système automatique de lutte contre l'incendie.	2.618E-02	2.739E-02	2.879E-02
BS_3 : Plan d'intervention d'urgence	1.182E-02	1.275E-02	1.347E-02

TABLEAU 5.6– Comparaison des valeurs de probabilité de défaillance des barrières de sécurité d'urgence par le nombre flou intuitionniste triangulaire (Daas *et al.*, 2023, e).

Barrière de sécurité d'urgence	AHP	AHP floue type 1	AHP floue type 2
BS_1 : Détecteur feu/gaz et arrêt d'urgence	1.942E-02	1.927E-02	1.927E-02
BS_2 : Système automatique de lutte contre l'incendie.	7.912E-02	8.177E-02	8.475E-02
BS_3 : Plan d'intervention d'urgence	3.896E-02	4.216E-02	4.459E-02

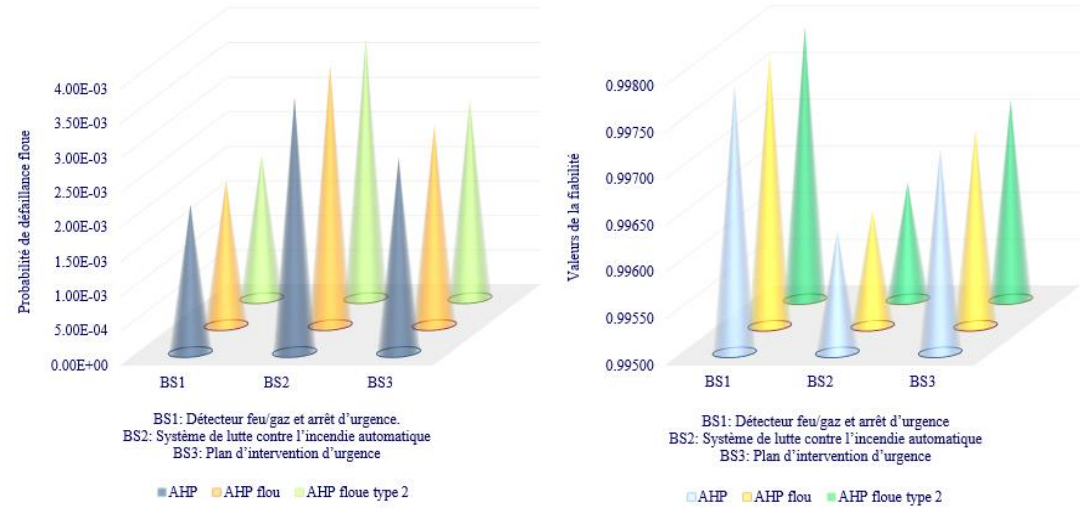
Les figures 5.1 (a) et (b) et 5.2 (a) et (b) représentent les valeurs de probabilité de défaillance floue et de la fiabilité des barrières de sécurité d'urgence en utilisant le nombre triangulaire et trapézoïdal respectivement et à l'aide des méthodes AHP, AHP flou type 1 et AHP flou type 2. La barrière de sécurité d'urgence la plus critique quand en utilise les nombres flous

triangulaire et trapézoïdal est le « système de lutte contre l'incendie automatique » avec une valeur de probabilité de défaillance floue de 9.039E-03 et de 3.750E-03, respectivement. Par conséquent, la barrière de sécurité qui a une valeur minimale de fiabilité est le « système automatique de lutte contre l'incendie », dans les deux cas de figures : 0.990 (nombre triangulaire flou) et 0.996 (nombre trapézoïdal flou).



(a). Valeurs de probabilité de défaillance floue. (b). Valeurs de la fiabilité.

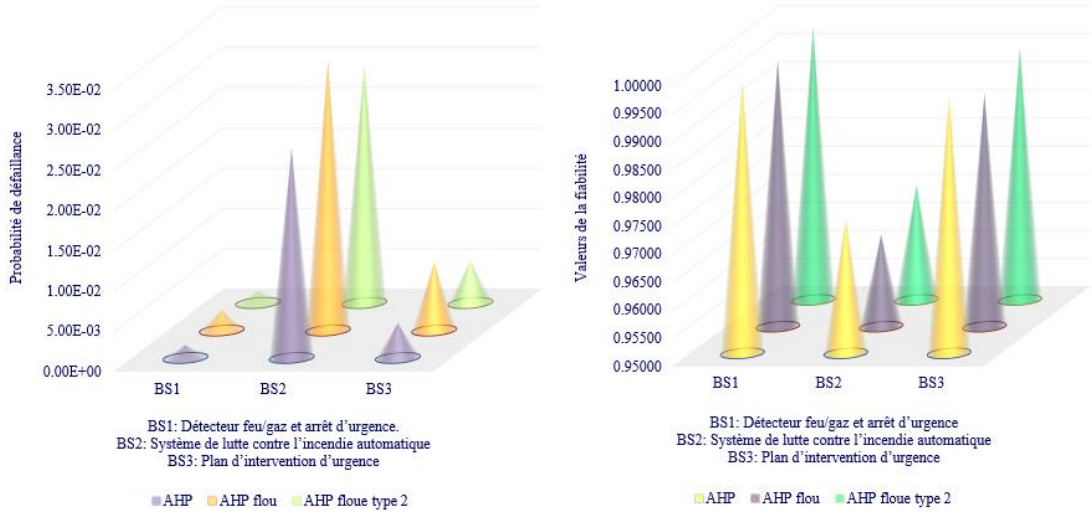
FIGURE 5.1 – Comparaison des valeurs de probabilité de défaillance floue et la fiabilité des barrières de sécurité d'urgence par le nombre flou traingulaire et à l'aide des méthodes AHP, AHP floue et AHP floue type 2.



(a). Valeurs de probabilité de défaillance floue (b). Valeurs de la fiabilité.

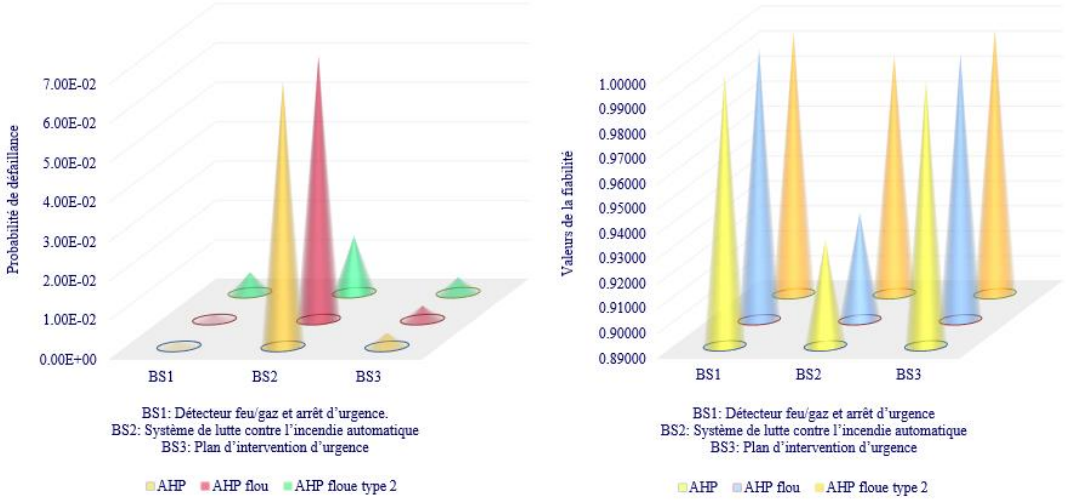
FIGURE 5.2– Comparaison des valeurs de probabilité de défaillance floue et la fiabilité des barrières de sécurité d'urgence par le nombre flou trapézoidal et à l'aide des méthodes AHP, AHP floue et AHP floue type 2 (Daas *et al.*, 2023, b).

Les figures 5.3 (a) et (b) et 5.4 (a) et (b) représentent les valeurs de probabilité de défaillance et de la fiabilité des barrières de sécurité d'urgence en utilisant le nombre flou triangulaire et trapézoïdal respectivement et à l'aide des méthodes AHP, AHP flou et AHP flou type 2. La barrière de sécurité d'urgence la plus critique quand en utilise les nombres flous triangulaire et trapézoïdal (Daas *et al*., 2023, b) est toujours « le système automatique de utte contre l'incendie » avec une valeur de probabilité de défaillance de 2.949E-02 et de 1.441E-03, respectivement. Par conséquent, la barrière de sécurité qui a une valeur minimale de fiabilité est le « système automatique de lutte contre l'incendie », dans les deux cas de figures : 0.970 (nombre triangulaire flou) et 0.998 (nombre trapézoïdal flou).



(a). Valeurs de probabilité de défaillance. (b). Valeurs de la fiabilité.

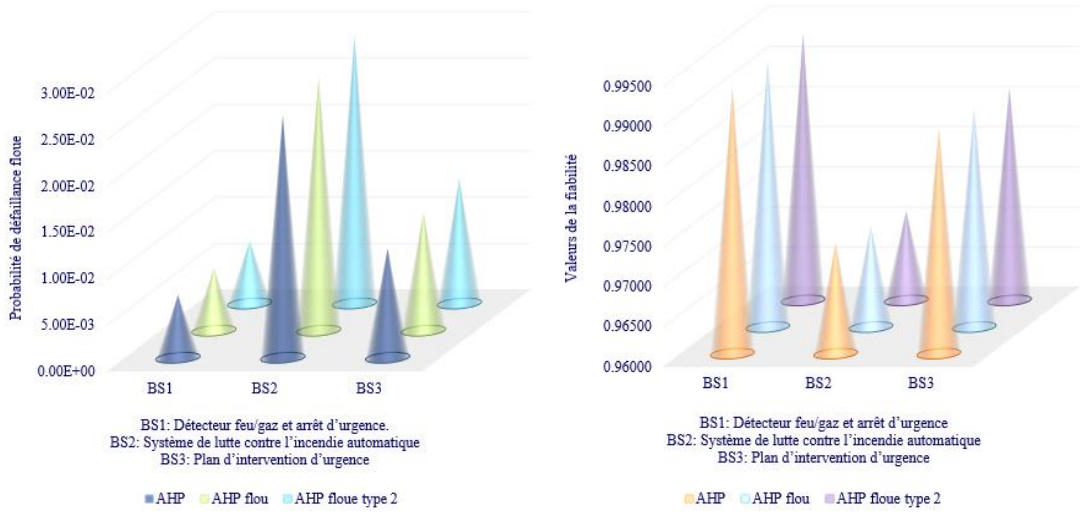
FIGURE 5.3 – Comparaison des valeurs de probabilité de défaillance et la fiabilité des barrières de sécurité d'urgence par le nombre flou traingulaire et à l'aide des méthodes AHP, AHP floue et AHP floue type 2 (Daas *et al*., 2023, b).



(a). Valeurs de probabilité de défaillance. (b). Valeurs de la fiabilité.

FIGURE 5.4– Comparaison des valeurs de probabilité de défaillance et la fiabilité des barrières de sécurité d'urgence par le nombre flou trapézoidal et à l'aide des méthodes AHP, AHP floue et AHP floue type 2 (Daas *et al*., 2023, b).

La figure 5.5 (a) et (b) représentent les valeurs de probabilité de défaillance floue et de la fiabilité des barrières de sécurité d'urgence en utilisant le nombre flou intuitionniste triangulaire et à l'aide des méthodes AHP, AHP flou et AHP flou type 2. La barrière de sécurité d'urgence la plus critique quand en utilise nombre le flou intuitionniste triangulaire est le « système automatique de lutte contre l'incendie » avec une valeur de probabilité de défaillance floue est de 2.879E-02. Par conséquent, la barrière de sécurité qui a une valeur minimale de fiabilité est le « système automatique de lutte contre l'incendie » avec une valeur de 0.971.

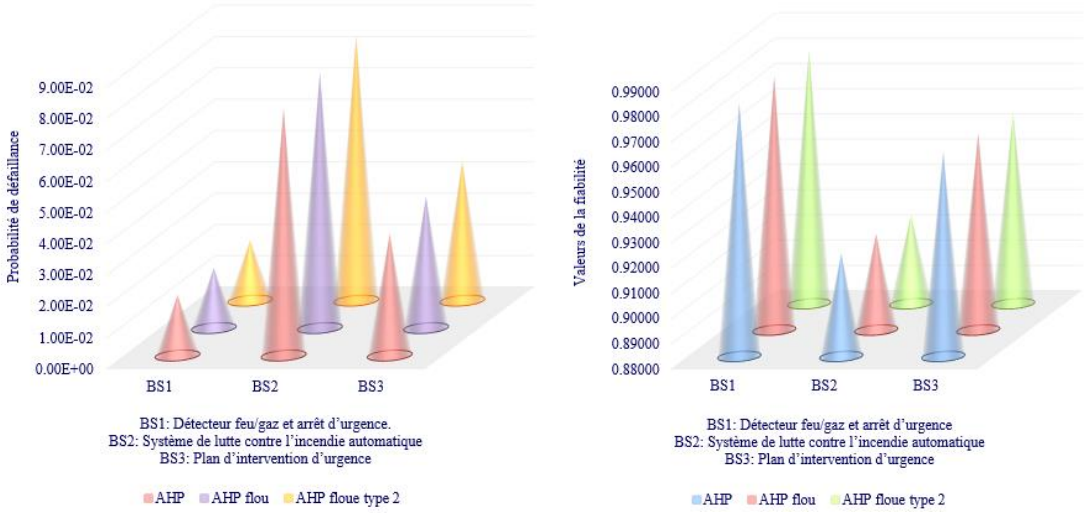


(a). Valeurs de probabilité de défaillance floue

(b). Valeurs de la fiabilité.

FIGURE 5.5– Comparaison des valeurs de probabilité de défaillance floue et la fiabilité des barrières de sécurité d'urgence par le nombre flou intuitionniste triangulaire et à l'aide des méthodes AHP, AHP floue et AHP floue type 2.

La figure 5.6 (a) et (b) représentent les valeurs de probabilité de défaillance et de la fiabilité des barrières de sécurité d'urgence en utilisant le nombre flou intuitionniste triangulaire et à l'aide des méthodes AHP, AHP flou et AHP flou type 2 (Daas et *al.*, 2024, e). La barrière de sécurité d'urgence la plus critique quand en utilise nombre le flou intuitionniste triangulaire est le « système automatique de lutte contre l'incendie » avec une valeur de probabilité de défaillance est de 8.475E-02. Par conséquent, la barrière de sécurité qui a une valeur minimale de fiabilité est le « système automatique de lutte contre l'incendie » avec une valeur de 0.9152.



(a). Valeurs de probabilité de défaillance (b). Valeurs de la fiabilité.

FIGURE 5.6– Comparaison des valeurs de probabilité de défaillance et la fiabilité des barrières de sécurité d'urgence par le nombre flou intuitionniste triangulaire et à l'aide des méthodes AHP, AHP floue et AHP floue type 2 (Daas *et al.*, 2024, e).

Selon les résultats obtenus, la différence du l'incertitude de l'évaluation de la probabilité de défaillance floue liée à l'utilisation de nombre flou triangulaire et le nombre flou trapézoïdal représente une valeur de 5.289E-03. En plus, la différence du l'incertitude de l'évaluation de la probabilité de défaillance liée à l'utilisation de nombre flou triangulaire et le nombre flou trapézoïdal représente une valeur de 2.804E-02. Par contre, la différence du l'incertitude de l'évaluation de la probabilité de défaillance floue et probabilité de défaillance liée à l'utilisation de nombre flou intuitionniste triangulaire représente une valeur de 5.596E-02. Donc, il est suggéré de mieux d'évaluer la fiabilité des barrières de sécurité d'urgence par l'évaluation de la probabilité de défaillance par la méthode AHP flou de type 2 en utilisons le nombre flou intuitionniste triangulaire.

Cependant, il est nécessaire d'augmenter la fiabilité du "système automatique de lutte contre l'incendie" grâce à une meilleure optimisation du temps de réparation des équipements, renforcer les programmes de prévention afin d'augmenter la durée de vie du système des pompes et tester régulièrement leur disponibilité à temps. En plus, il est important d'augmenter l'efficacité du "plan d'intervention d'urgence" en cas d'incendie par un ensemble de propositions à savoir : tester l'efficacité de ce plan régulièrement, assurer les moyens nécessaires aux interventions et de minimiser le temps de réponse dans le déclenchement des plans d'interventions, afin de mieux gérer les accidents industriels majeurs.

5.3. Résultats numériques relatifs aux fréquences des conséquences d'urgence

La première étape dans le calcul des fréquences des conséquences d'urgence consiste à calculer la probabilité de défaillance floue des barrières de sécurité d'urgence, la fréquence de l'événement initiateur étant déjà connue. Selon le rapport de l'étude de danger de l'unité GPL qui a été réalisé par le bureau d'étude international (DNV), la fréquence d'une grande fuite de GPL est de 2.56E-06/an. Par conséquent, en utilisant les équations (2.57), (2.58) et (2.59) (voir chapitre 2), nous pouvons calculer la fréquence de chaque conséquence d'urgence CU_{i1} sur la base des probabilités de défaillances floues des barrières de sécurité d'urgence.

Les tableaux 5.7 et 5.8, présentent les valeurs de la fréquence d'occurrence des différentes conséquences d'urgences relative au scénario d'accident « *feu de nappe* » en fonction de la probabilité de défaillance floue et par le nombre flou triangulaire et trapézoïdal.

TABLEAU 5.7 – Fréquences d'occurrence des conséquences d'urgences en cas feu de nappe en fonction de la probabilité de défaillance floue et le nombre flou triangulaire.

Conséquences d'urgences (CU_{i1})	AHP	AHP floue	AHP floue type 2
CU_{11}: Incendie local et blessés.	3.978E-09	3.781E-09	3.772E-09
CU_{12}: Incendie développé et blessés légers.	4.697E-11	4.833E-11	5.470E-11
CU_{13}: Incendie local et blessés lourdes.	1.501E-08	1.451E-08	1.611E-08
CU_{14}: Incendie développé et blessés lourdes.	1.772E-06	1.772E-06	1.772E-06

TABLEAU 5.8 – Fréquences d'occurrence des conséquences d'urgences en cas feu de nappe en fonction de la probabilité de défaillance floue et le nombre flou trapézoïdal) (Daas *et al.*, 2023,c).

Conséquences d'urgences (CU_{i1})	AHP	AHP floue	AHP floue type 2
CU_{11}: Incendie local et blessés.	3.829E-09	3.756E-09	3.729E-09
CU_{12}: Incendie développé et blessés légers.	1.856E-11	1.939E-11	1.919E-11
CU_{13}: Incendie local et blessés lourdes.	6.583E-09	6.693E-09	6.679E-09
CU_{14}: Incendie développé et blessés lourdes.	1.779E-06	1.779E-06	1.779E-06

Les tableaux 5.9 et 5.10, présentent les valeurs de la fréquence d'occurrence des différentes conséquences d'urgences relative au scénario d'accident « *feu de nappe* » en fonction de la probabilité de défaillance et par le nombre flou triangulaire et trapézoïdal.

TABLEAU 5.9 – Fréquences d'occurrence des conséquences d'urgences en cas feu de nappe en fonction de la probabilité de défaillance et le nombre flou triangulaire (Daas et *al.*, 2023, b).

Conséquences d'urgences (CU_{i1})	AHP	AHP floue	AHP floue type 2
CU_{11}: Incendie local et blessés.	4.000E-09	4.578E-09	2.485E-09
CU_{12}: Incendie développé et blessés légers.	2.900E-10	5.556E-10	2.771E-10
CU_{13}: Incendie local et blessés lourdes.	6.710E-08	6.473E-08	5.116E-08
CU_{14}: Incendie développé et blessés lourdes.	2.510E-06	1.720E-06	1.1736E-06

TABLEAU 5.10 – Fréquences d'occurrence des conséquences d'urgences en cas feu de nappe en fonction de la probabilité de défaillance et le nombre flou trapézoïdal.

Conséquences d'urgences (CU_{i1})	AHP	AHP floue	AHP floue type 2
CU_{11}: Incendie local et blessés.	2.351E-09	2.412E-09	9.386E-09
CU_{12}: Incendie développé et blessés légers.	4.236E-10	4.305E-10	1.017E-10
CU_{13}: Incendie local et blessés lourdes.	1.201E-08	1.196E-08	2.559E-08
CU_{14}: Incendie développé et blessés lourdes.	1.669E-06	1.670E-06	1.757E-06

Le tableau 5.11 et 5.12, présente les valeurs de la fréquence d'occurrence des différentes conséquences d'urgences relative au scénario d'accident « *feu de nappe* » en fonction de la probabilité de défaillance floue, en fonction de la probabilité de défaillance et par le nombre flou intuitionniste triangulaire.

TABLEAU 5.11 – Fréquences d'occurrence des conséquences d'urgences en cas feu de nappe en fonction de la probabilité de défaillance floue et le nombre flou intuitionniste triangulaire.

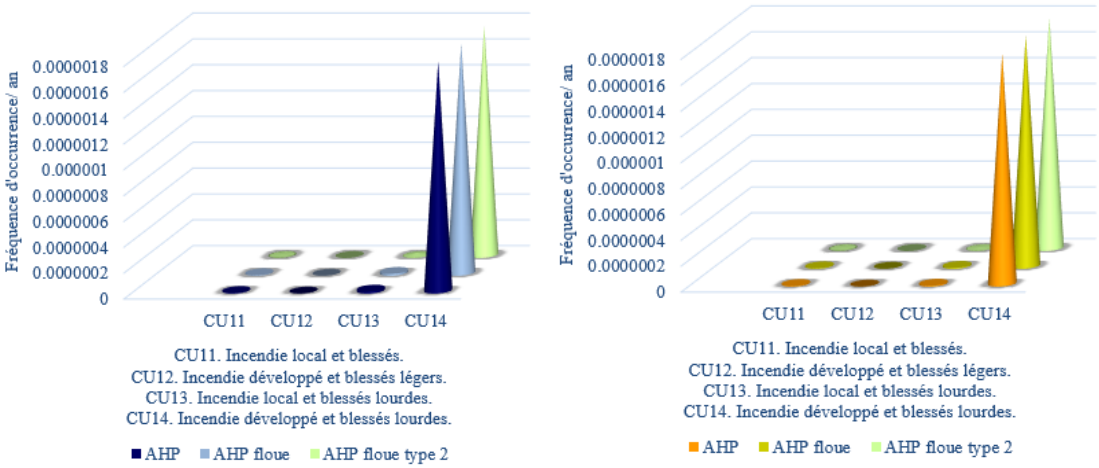
Conséquences d'urgences (CU_{i1})	AHP	AHP floue	AHP floue type 2
CU_{11}: Incendie local et blessés.	2.351E-09	2.412E-09	9.386E-09
CU_{12}: Incendie développé et blessés légers.	4.236E-10	4.305E-10	1.017E-10
CU_{13}: Incendie local et blessés lourdes.	1.201E-08	1.196E-08	2.559E-08
CU_{14}: Incendie développé et blessés lourdes.	1.669E-06	1.670E-06	1.757E-06

TABLEAU 5.12 – Fréquences d'occurrence des conséquences d'urgences en cas feu de nappe en fonction de la probabilité de défaillance et le nombre flou intuitionniste triangulaire (Daas et *al.*, 2023, e).

Conséquences d'urgences (CU_{i1})	AHP	AHP floue	AHP floue type 2
CU_{11}: Incendie local et blessés.	3.480E-08	3.453E-08	3.453E-08
CU_{12}: Incendie développé et blessés légers.	5.417E-09	6.059E-09	6.641E-09
CU_{13}: Incendie local et blessés lourdes.	1.336E-07	1.376E-07	1.423E-07
CU_{14}: Incendie développé et blessés lourdes.	1.609E-06	1.614E-06	1.618E-06

La figure 5.7 (a) et (b), représente les résultats obtenus graphiquement en fonction de l'évaluation de la probabilité de défaillance floue des barrières de sécurité d'urgence. Cependant les résultats obtenus lors de l'utilisation le nombre floue triangulaire et par l'application de la méthode AHP, AHP floue et AHP floue de type 2, montrent que la conséquence d'urgence la plus critique est « *incendie développé et blessés lourdes* », car la valeur de fréquence est la plus élevée avec une valeur de 1.772E-06/an. Donc, les résultats obtenus à l'aide de la méthode AHP floue de type 2, montrent que les conséquences d'urgence « *incendie local et blessés lourdes* » et « *incendie local et blessés* » sont classés deuxième et troisième avec des valeurs de fréquence de 1.611E-08/an et 3.772E-09/an, respectivement. Par conséquence, les résultats obtenus, lors de l'utilisation le nombre floue trapézoïdal, et par l'application de la méthode AHP floue de type 2, montrent que la conséquence d'urgence la plus critique est « *incendie développé et blessés lourdes* », car la valeur de fréquence est la plus élevée avec une valeur de 1.779E-06/an. Les conséquences d'urgence « *incendie local et blessés lourdes* » et « *incendie local et blessés* » sont classés deuxième et troisième avec des valeurs de fréquence de 6.679E-09/an et 3.729E-09/an, respectivement (Daas *et al.*, 2023, c).

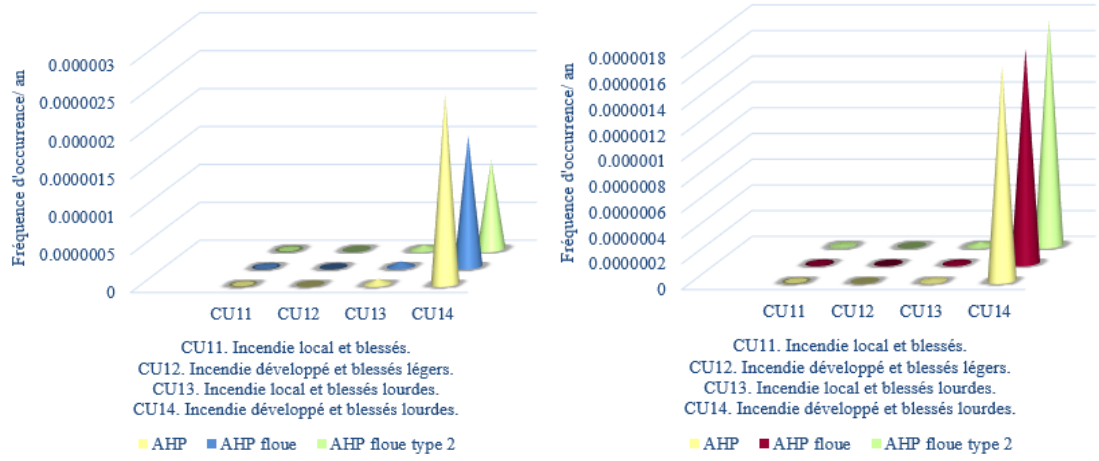
La figure 5.8 (a) et (b), représente les résultats obtenus graphiquement en fonction de l'évaluation de la probabilité de défaillance des barrières de sécurité d'urgence. Cependant les résultats obtenus lors de l'utilisation le nombre floue triangulaire et par l'application de la méthode AHP, AHP floue et AHP floue de type 2, montrent que la conséquence d'urgence la plus critique est « *incendie développé et blessés lourdes* », car la valeur de fréquence est la plus élevée avec une valeur de 1.737E-06/an. Les conséquences d'urgence « *incendie local et blessés lourdes* » et « *incendie local et blessés* » sont classés deuxième et troisième avec des valeurs de fréquence de 5.249E-08/an et 2.675E-09/an, respectivement. Par conséquence, les résultats obtenus, lors de l'utilisation le nombre floue trapézoïdal, et par l'application de la méthode AHP floue de type 2, montrent que la conséquence d'urgence la plus critique est « *incendie développé et blessés lourdes* », car la valeur de fréquence est la plus élevée avec une valeur de 1.757E-06/an. En plus, les conséquences d'urgence « *incendie local et blessés lourdes* » et « *incendie local et blessés* » sont classés deuxième et troisième avec des valeurs de fréquence de 2.559E-08/an et 9.386E-09/an, respectivement (Daas *et al.*, 2023, c).



(a). Fréquence d'occurrence (nombre flou triangulaire)

(b). Fréquence d'occurrence (nombre flou trapézoïdal).

FIGURE 5.7 – Fréquences des conséquences d'urgence obtenues à l'aide des méthodes AHP, AHP flou et l'AHP flou type 2 (Daas *et al.*, 2023, d).



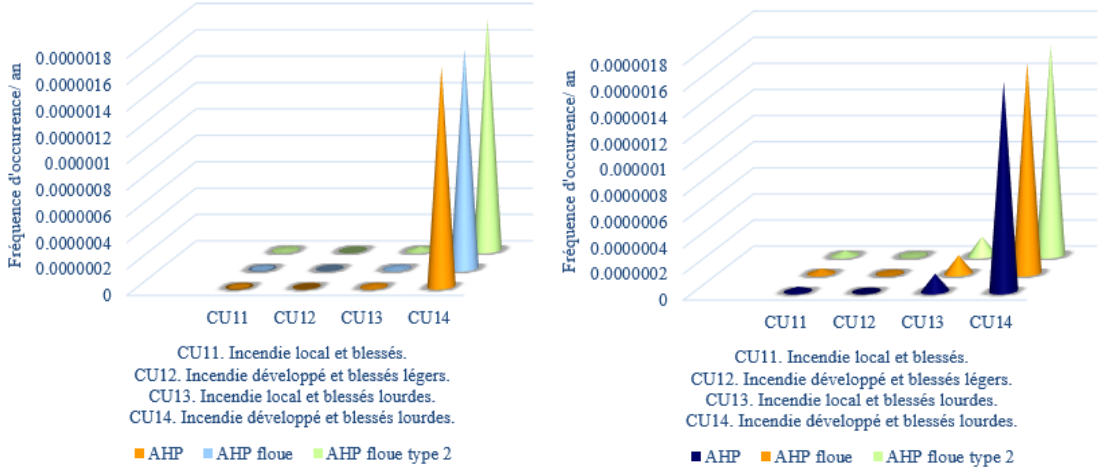
(a). Fréquence d'occurrence (nombre flou triangulaire)

(b). Fréquence d'occurrence (nombre flou trapézoïdal)

FIGURE 5.8 – Fréquences des scénarios d'urgence obtenues en fonction de la probabilité de défaillance et par les méthodes AHP, AHP flou et l'AHP flou type 2 (Daas *et al.*, 2023, d).

La figure 5.9 (a) et (b), représente les résultats obtenus graphiquement en fonction de nombre flou intuitionniste triangulaire. Cependant les résultats obtenus lors de l'utilisation des résultats de la probabilité de défaillance floue et par l'application de la méthode AHP, AHP floue et AHP floue de type 2, montrent que la conséquence d'urgence la plus critique est « *incendie développé et blessés lourdes* », car la valeur de fréquence est la plus élevée avec une valeur de 1.757E-06/an. En plus, les conséquences d'urgence « *incendie local et*

blessés lourdes » et « *incendie local et blessés* » sont classés deuxième et troisième avec des valeurs de fréquence de 2.559E-08/an et 9.386E-09/an, respectivement. Par conséquence, les résultats obtenus, lors de l'utilisation des résultats de la probabilité de défaillance et par l'application de la méthode AHP floue de type 2, montrent que la conséquence d'urgence la plus critique est « *incendie développé et blessés lourdes* », car la valeur de fréquence est la plus élevée avec une valeur de 1.618E-06/an (Daas *et al.*, 2023-e). En plus, les conséquences d'urgence « *incendie local et blessés lourdes* » et « *incendie local et blessés* » sont classés deuxième et troisième avec des valeurs de fréquence de 1.423E-07/an et 3.453E-08/an, respectivement.



(a). Fréquence d'occurrence (probabilité de défaillance floue).

(b). Fréquence d'occurrence (probabilité de défaillance)

FIGURE 5.9 – Fréquences des scénarios d'urgence obtenues en fonction de nombre flou intuitionniste triangulaire et par les méthodes AHP, AHP flou et l'AHP flou type 2 (Daas *et al.*, 2024, e).

Le Tableau 5.13 et la Figure 5.10 représentent les fréquences d'occurrence des scénarios d'accidents liés à une grande fuite de GPL. Il convient de noter que lors de l'utilisation des trois différentes représentations d'incertitudes (nombre flou trapézoïdal, triangulaire ou flou intuitionniste triangulaire) et lors de l'évaluation de la probabilité de défaillance floue et probabilité de défaillance des barrières de sécurité, on constate que la valeur du scénario d'accident « feu de nappe » issue de l'étude HAZOP est la somme des conséquences d'urgence obtenues à partir de cette étude. Les résultats obtenus indiquent que les valeurs de fréquence d'occurrence sont les plus fiables et précises lors de l'utilisation de la méthode AHP flou type 2 (Daas *et al.*, 2023,b-d).

TABLEAU 5.13 – Fréquences d'occurrence des scénarios d'accidents initiés par une grande fuite de GPL (Daas *et al.*, 2023, b-d).

Scénarios d'accidents	AHP	AHP floue	AHP floue type 2
SA_1 : Feu de nappe	1.790E-06	1.790E-06	1.790E-06
SA_2 : VCE	2.150E-07	2.150E-07	2.150E-07
SA_3 : Feu de chalumeau	3.220E-07	3.220E-07	3.220E-07
SA_4 : Pollution	2.300E-07	2.300E-07	2.300E-07

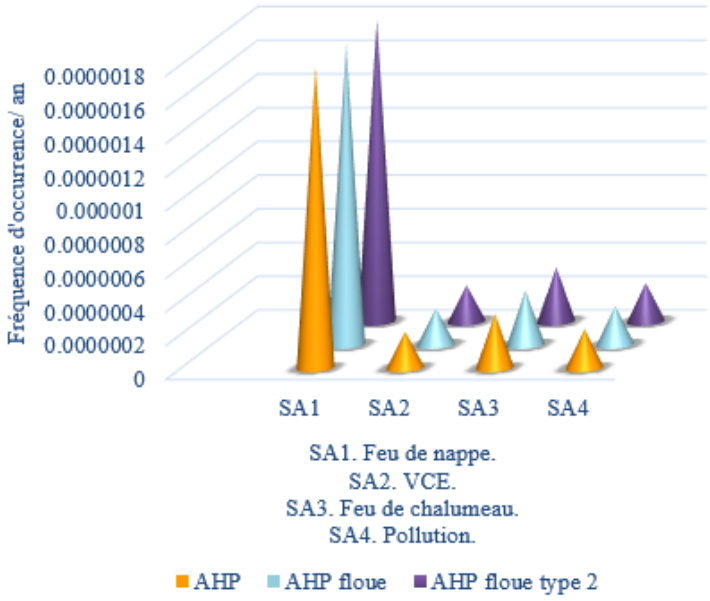


FIGURE 5.10– Fréquences d'occurrence des scénarios d'accident initiés par une fuite de GPL (Daas *et al.*, 2023, b-d).

5.4. Résultats numériques relatifs à l'optimisation de la fiabilité de la barrière BS_2

Après l'identification de la barrière de sécurité d'urgence critique en termes de non fiabilité (indisponibilité), l'étape suivante est consacrée à l'évaluation de la fiabilité de cette barrière en tenant compte de l'analyse dysfonctionnelle via la combinaison des méthodes AMPEC et AHP floue. L'objectif de cette analyse est d' hiérarchiser l'impact des perturbations de cette barrière critique sur les facteurs de risque : personnel, environnement, public et production (Daas *et al.*, 2023,c). Par la suite, une analyse par arbre de défaillance a été effectuée avec l'opérateur d'agrégation pondérée ordonnée floue amélioré pour déterminer

les événements de base les plus critiques. Les résultats de la hiérarchisation de l'influence des perturbations par la méthode AHP floue sur les facteurs de risque montrent que la perturbation du BS_2 "système automatique de lutte contre l'incendie" a un impact important sur le facteur de risque *personnel* avec un score de 44,4% par rapport aux autres facteurs de risque. Ces résultats signifient que les perturbations sur le bon fonctionnement des barrières ont un impact sérieux sur la vie des personnes (Daas *et al.*, 2023,c). La figure 5.11 représente les résultats de cette hiérarchisation. Les résultats obtenus à l'aide de la méthode AHP floue sont plus fiables que ceux obtenus par la méthode AHP classique (Daas *et al.*, 2023,c).

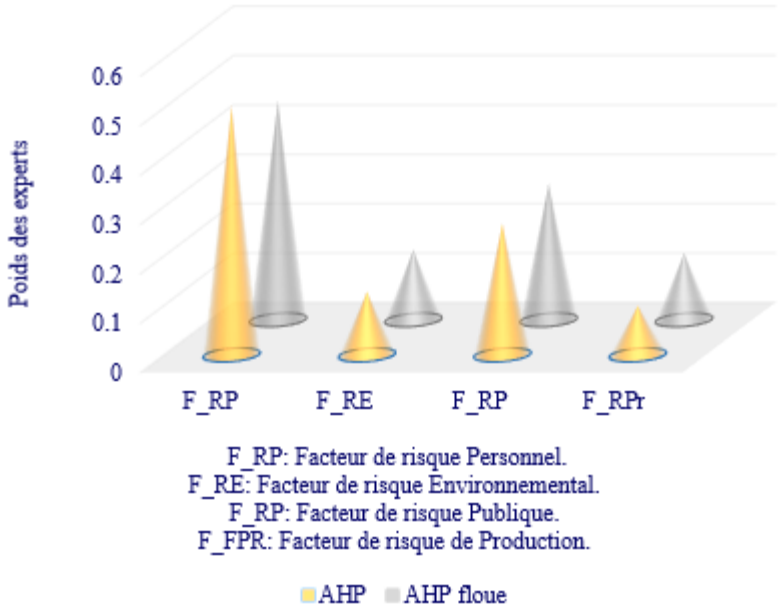


FIGURE 5.11– Comparaison des scores des facteurs de risque en utilisant les méthodes AHP et AHP floue (Daas *et al.*, 2023,c).

Les figures 5.12, 5.13, 5.14 et 5.15 montre respectivement les valeurs de score pour les actions correctives, visant l'amélioration de la fiabilité du système automatique de lutte contre l'incendie, associées aux quatre facteurs de risque (personnel, environnement, public et production) en utilisant les méthodes AHP classique et AHP floue. Concernant le facteur « *personnel* », l'action corrective 10 « *révision et amélioration des procédures et consignes de travail* » est la plus importante avec un score de 17.2 % (Daas *et al.*, 2023,c).

L'action corrective 4 « application d'essais de maintenance cycliques » présente un score de 15.1% concernant le facteur de risque environnemental, un score 16.1% concernant le facteur de risque public et un score de 15.5% pour le facteur de risque production (Daas *et al.*, 2023,c).

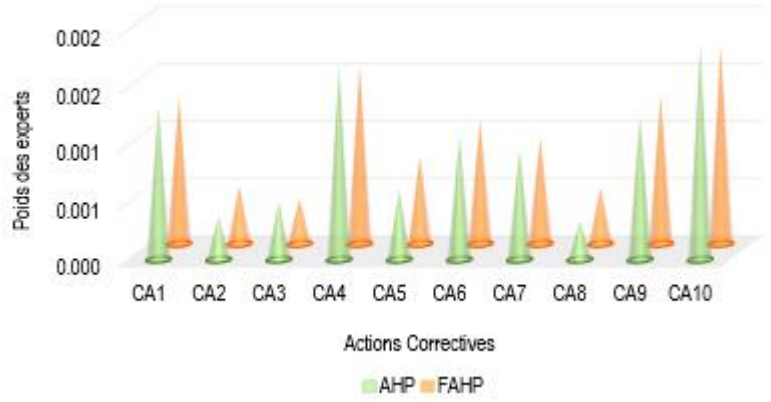


FIGURE 5.12– Poids des experts relatifs au facteur du risque personnel (Daas *et al.*, 2023, c).

FIGURE 5.13– Poids des experts relatifs au facteur du risque environnemental (Daas *et al.*, 2023, c).

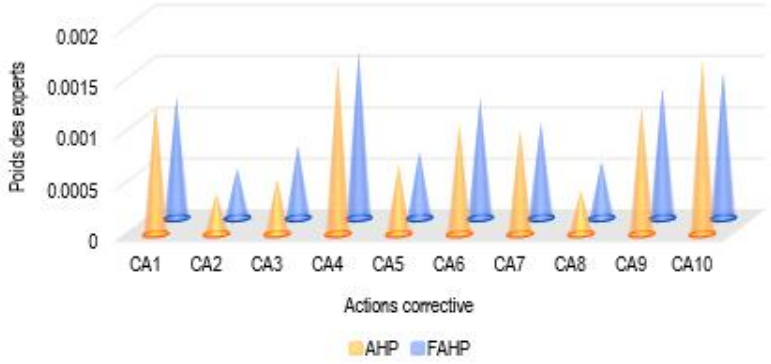


FIGURE 5.14– Poids des experts relatifs au facteur du risque public (Daas *et al.*, 2023, c).

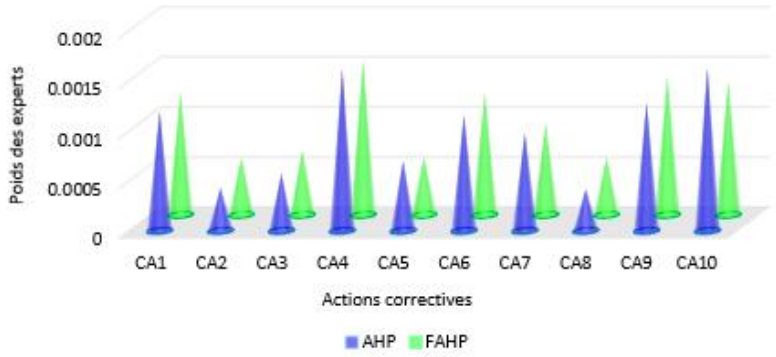


FIGURE 5.15– Poids des experts relatifs au facteur du risque production (Daas *et al.*, 2023, c).

Les résultats présentés précédemment dans le tableau 4.7, et comme nous l'avions déjà mentionné, ont montré que la barrière de sécurité d'urgence BS_2 « *système automatique de lutte contre l'incendie* » est la barrière de sécurité la plus critique vis-à-vis de l'évènement initiateur « *perte de confinement* ». Donc, il est important de réévaluer la fiabilité de cette barrière de sécurité dont le but de chercher les évènements de base qui contribuent le plus à la défaillance de cette barrière et qui automatiquement aggravent les conséquences d'urgence en cas de feu de nappe. A cet effet, une méthode hybride basée sur l'opérateur de l'agrégation moyenne pondérée ordonnée floue amélioré, la théorie de l'ensemble flou basé sur le nombre trapézoïdal flou et l'analyse par arbre de défaillance est mise en œuvre (voir chapitre 4).

Les probabilités de défaillance de la barrière «système automatique de lutte contre l'incendie», P_{TE}, par l'agrégation des nombres flous trapézoïdal et triangulaire sont respectivement $1.550E-02$ (une fiabilité de 0.984) et $7.742E-02$ (une fiabilité de 0.925). La figure 5.16 représente les probabilités des différents événements de base dans les deux cas de figure. La figure 5.17 affiche les valeurs relatives à la fiabilité relative aux événements de base. Elle montre clairement que l'usage du nombre flou triangulaire abouti à des fiabilités optimistes.

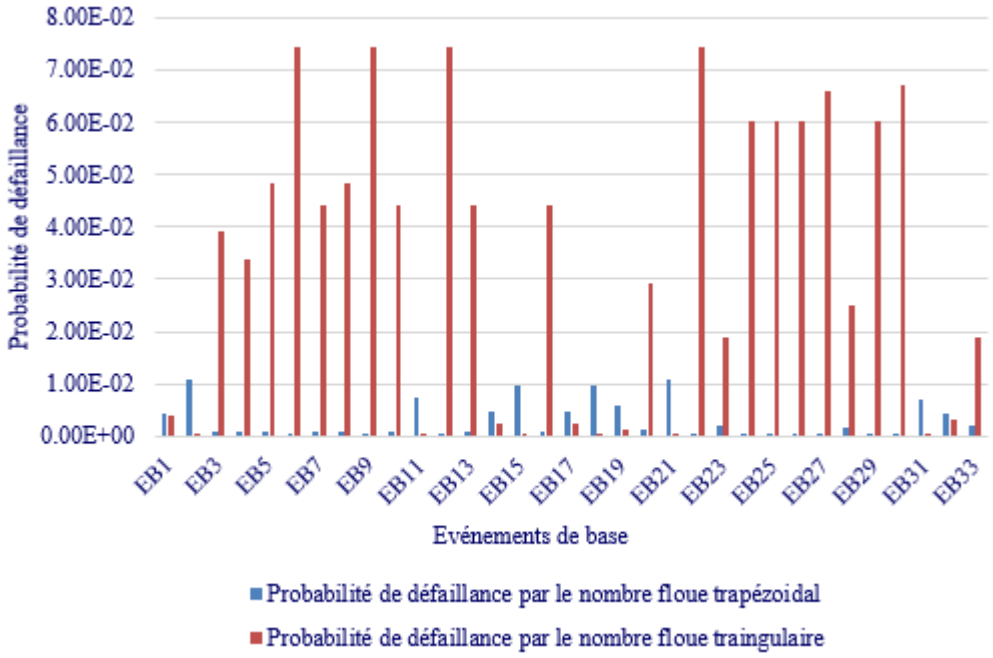


FIGURE 5.16 – Comparaison entre les valeurs des probabilités de défaillance calculées par le nombre flou trapézoïdal et triangulaire (Daas *et al.*, 2023, c-d).

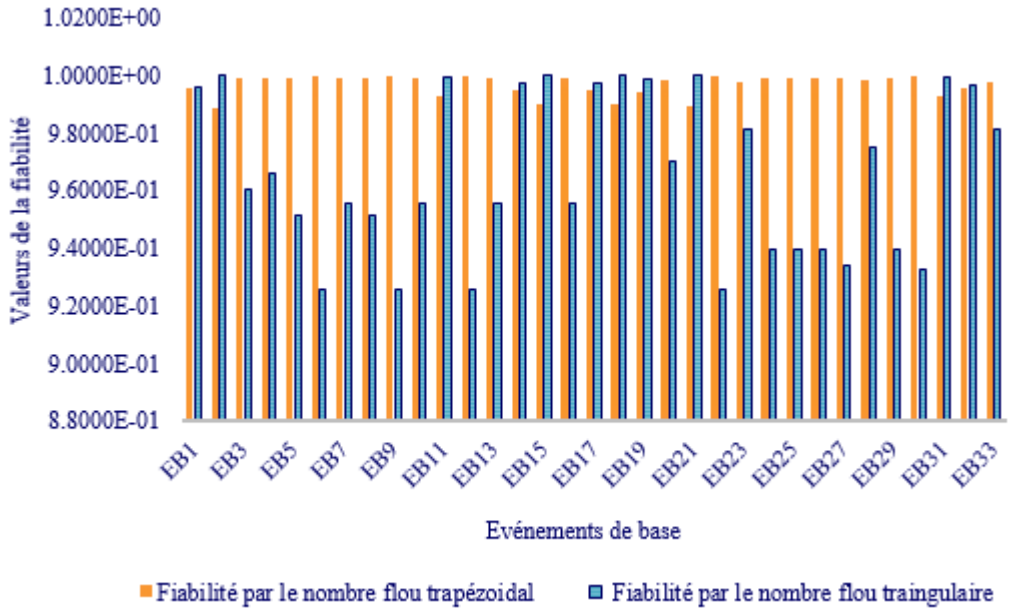


FIGURE 5.17– Valeurs des fiabilités calculées par les nombres flous trapézoïdal et triangulaire (Daas *et al.*, 2023, c-d).

.

La figure 5.18, dont les valeurs des facteurs d'importance de réduction de risque (RRW) calculées par le nombre flou trapézoïdal et par le nombre flou triangulaire. Le classement des évènements de base selon le facteur d'importance RRW calculé par le nombre flou trapézoïdal est plus élevé pour les évènements de base "EB_2" et "EB_{21}". Pa contre, le classement des

évènements de base selon le facteur d'importance RRW calculé par le nombre flou triangulaire est plus élevé pour l'évènement de base "EB_6".

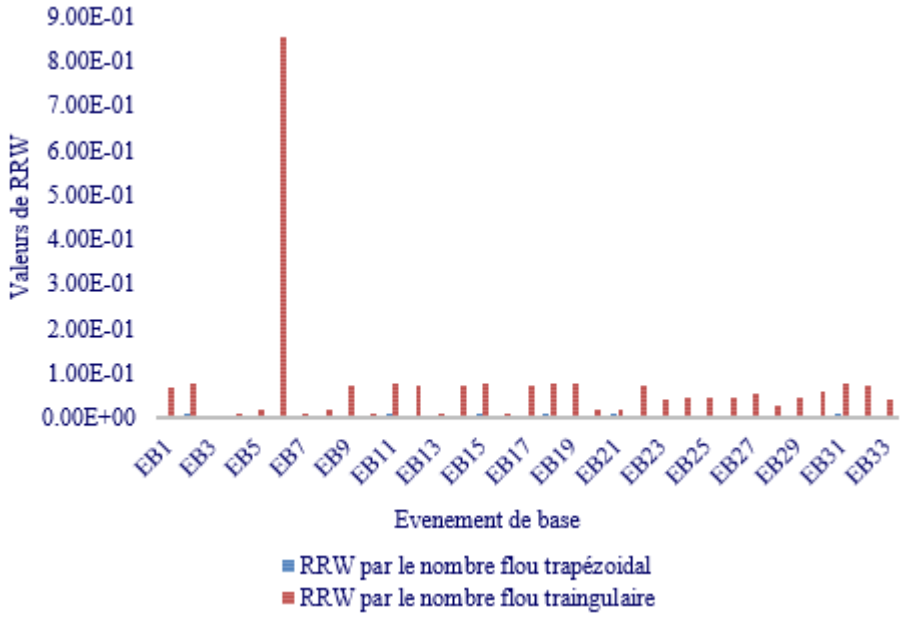


FIGURE 5.18 – Valeurs de réduction de risque (RRW) calculées par les nombres flous trapézoïdal et triangulaire (Daas *et al.*, 2023, a).

Le tableau 5.14, dont un extrait des valeurs de facteur d'importance de Fussell-vesely (FV) pour les coupes minimales les plus critiques est calculé par le nombre flou triangulaire et par le nombre flou trapézoïdal.

TABLEAU 5.14 – Extrait des valeurs de facteur d'importance de Fussell-vesely (FV) calculées par les nombres flous trapézoïdal et triangulaire (Daas *et al.*, 2023, a).

Description	Nombre flou triangulaire	Nombre flou trapézoïdal
	F-VIM	F-VIM
Défaillance de la pompe jockey 2	0.6452	0.6796
Défaillance du système reservoir.	0.9587	0.8993
Défaillance du système de pompe du puits	0.9529	0.6085
Réservoir B inutilisé	0.8105	0.8496
Défaillance de la pompe jockey B	0.6452	0.7941
Faible niveau d'eau dans les réservoirs	0.9791	0.9983
Défaillance du système de pompe électrique A	0.6337	0.8045
Défaillance de la pompe Jockey A	0.6452	0.6796

Rappelons que parmi les objectifs de cette étude est l'amélioration de la fiabilité du "système automatique de lutte contre l'incendie" par l'optimisation des actions de correctives relatives aux évènements de base les plus critiques. A cet effet, une analyse de sécurité subjective est utilisée. La figure 5.19 présente le classement des différentes actions correctives visant l'amélioration de la fiabilité relative à l'événement de base "EB_2". Plus précisément, la priorité de mise en œuvre des actions correctives est indiquée dans le classement suivant : {AC4 > AC5 > AC10 > AC2 > AC9 > AC6 > AC7 > AC8 > AC1 > AC3}. Il en ressort que l'AC_4 "application des essais de maintenance cycliques" soit la plus prioritaire vis-à-vis de cette amélioration et donc dans le processus d'amélioration du "système automatique de lutte contre l'incendie".

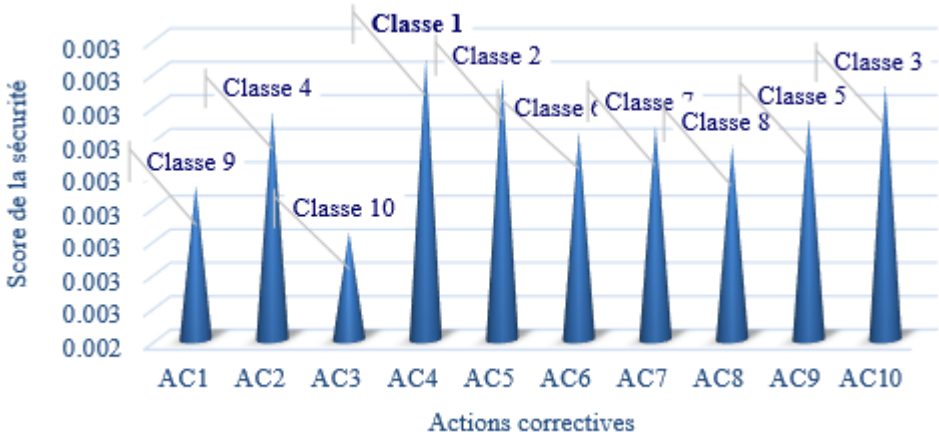


FIGURE 5.19 – Classement des scores de la sécurité des actions correctives relatives à "EB_2" (Daas *et al.*, 2023,d).

5.5. Conclusion

L'objectif de ce chapitre était l'amélioration de la fiabilité (au sens de la disponibilité) des barrières de sécurité d'urgence liées à un réservoir de stockage de GPL. Afin d'atteindre cette objectif, nous avons d'abord conduit une évaluation des probabilités de défaillance floue des barrières de sécurité d'urgence, déjà identifiées au niveau du quatrième chapitre. Cette évaluation s'appuie sur des nombres flous trapézoidal, triangulaire et intuitioniste triangulaire et les méthodes AHP, AHP floue et AHP floue type 2. Les probabilité de défaillance des barrières de sécurité ainsi obtenu ont été utilisées pour le calcul des différentes fréquences relatives aux scénarios d'accidents identifiés.

Les résultats obtenus ont montré que la barrières de sécurité « systèmes automatiques de lutte contre l'incendie » est la barrière la plus critique du fait qu'elle possède la plus haute probabilité de défaillance. Cela dit, la disponibilité de cette barrière de sécurité doit être améliorée. Cette amélioration s'est amorcée par la hiérarchisation des perturbations de cette barrière sur le personnel, l'environnement, le publique et sur la production en se basant sur une extension de la méthode AMDEC et la méthode AHP floue. La disponibilité de la

barrière de sécurité critique a été ensuite calculée à l'aide des AdD. Dans ce contexte, l'évaluation des probabilités de défaillance liées aux différents événements de base a été effectuée par l'intégration de la théorie des ensembles flous, une agrégation moyenne pondérée ordonnée floue pour s'affranchir du problème d'incertitude associé aux données de fiabilité.

L'approche s'est poursuivie par l'optimisation ou l'amélioration de la fiabilité de la barrière de sécurité d'urgence « systèmes automatiques de lutte contre l'incendie » en se fondant sur une analyse d'importance (facteurs d'importance FV et RRW), d'une part, et sur une analyse de sécurité subjective utilisant la théorie du raisonnement probant, d'autre part. Les résultats obtenus concernaient la priorisation de dix actions correctives en termes d'efficacité sur l'amélioration de la fiabilité de la barrière de sécurité « systèmes automatiques de lutte contre l'incendie ».

Conclusion générale

La gestion des risques et maitrise des accidents industriels est une responsabilité réglementaire au sein des installations pétrolières et gazières en Algérie. A cet effet, il est important de maintenir ou de renforcer la fiabilité des barrières de sécurité, afin de protéger les personnes, l'environnement et les équipements. Ce travail doctoral rentre dans le cadre de la problématique de prise en compte des incertitudes, qui entachent les données ou paramètres, dans l'évaluation et l'amélioration de de la fiabilité des barrières de sécurité. Et ce dans le but d'aider les décideurs à comprendre comment ils peuvent soutenir les décisions visant à réduire les risques associées aux installations industrielles (par exemple, le stockage de GPL). Plus précisément, dans le cadre de ce travail, nous avons tenté de surmonter les incertitudes liés à la subjectivité des experts dans l'évaluation de la probabilité de défaillance des barrières de sécurité et dans la priorisation des actions correctives. Plus de détail est donné dans ce qui suit.

Le premier chapitre était dédié à un de l'art sur la gestion des risques et la maitrise des accidents industriels, en termes de définitions et de concepts liés aux barrières de sécurité.

Au cours du deuxième chapitre, nous avons proposé une méthodologie basée sur la théorie des ensembles flous intégrée à la méthode multicritères AHP et des techniques d'agrégation pour évaluer la probabilité de défaillance des barrières de sécurité d'urgence. La méthode proposée a été illustrée et validée, aux niveaux des chapitres 4 et 5, sur une étude de cas d'une sphère de stockage GPL. En termes de résultats numériques, la probabilité de défaillance floue est élevée lors de l'utilisation d'un nombre flou triangulaire et de la méthode AHP floue de type 2. Aussi, l'usage du nombre flou intuitionniste triangulaire conduit au constat précédent. Par ailleurs, la barrière de sécurité d'urgence possédant la probabilité de défaillance la plus élevé est « le système automatique de lutte contre l'incendie». Notons que l'estimation des fréquences d'occurrences des scénarios d'accidents est réalisée en utilisant la méthode de l'arbre des événements en utilisant les valeurs de probabilités de défaillances obtenues.

Nous nous sommes ensuite concentrés, au niveau du troisième chapitre, sur l'évaluation de la disponibilité de la barrière de sécurité d'urgence la moins fiable, afin de l'améliorer. L'objectif, dans un premier temps, est de déterminer les composants critiques de cette barrière. A ce titre, nous avons proposé une démarche d'amélioration de la fiabilité de la barrière de sécurité d'urgence. Cette démarche se base essentiellement sur l'usage des AdD où les probabilités des événements de base ont été estimées en faisant recours à une technique nommée « opérateur de la moyenne pondérée ordonnée incertaine dépendante amélioré ». L'identification des événements de base critiques est réalisée à l'aide de deux facteurs d'importance usuels, à savoir le facteur de réduction de risque (RRW) et le facteur de Fussell-Vesely (FV). Nous avons ensuite proposé une procédure, à l'aide de l'analyse subjective de la sécurité et de la théorie du raisonnement probant, qui permet la priorisation des actions correctives en fonction de leur impact sur l'efficacité de la barrière de sécurité

considérée. Cette approche intègre les résultats de l'étude d'importance des événements de base et la hiérarchisation des impacts de perturbation des barrières de sécurité sur le personnel, l'environnement, le public et sur la production. Pour obtenir cette hiérarchisation, nous avons opté pour une démarche basée sur la méthode AMPEC (une variante de l'AMDEC) et la méthode AHP floue.

L'illustration de cette nouvelle approche a été réalisée aux niveaux des chapitres 4 et 5, et effectuée sur le système automatique d'extinction incendie (identifié précédemment comme le maillon faible) lié à la sphère de stockage de GPL. Les résultats obtenus ont montré que le facteur de risque le plus impacté par la perturbation de la barrière de sécurité est le personnel avec un score de 44,4%, c'est-à-dire l'accident d'incendie affecte plus les personnes dans l'unité GPL suite à un dysfonctionnement du système automatique de lutte contre l'incendie. Par ailleurs, une fois que la probabilité de défaillance de cette barrière de sécurité est évaluée et les événements de base critiques sont établis, dix actions correctives ont été priorisées.

Les différents résultats obtenus valident et confirme l'applicabilité des différentes démarches proposées dans le cadre de ce travail doctoral.

Concernant les travaux futurs, certains développements pourraient porter sur l'amélioration des différentes approches proposées par l'intégration du facteur temps : utilisation des lois de probabilité autre que la loi constante utilisée dans ce travail. Aussi, il serait très intéressant d'utiliser des techniques d'agrégation issues de la théorie des évidences (croyances). Un autre axe d'amélioration concerne l'usage des ensembles flous pythagoriciens pour mieux prédire l'incertitude dans l'évaluation de la fiabilité des barrières de sécurité d'urgence.

Références Bibliographiques

Acarbay, C., & Kiyak, E. (2020). Risk mitigation in unstabilized approach with fuzzy Bayesian bow-tie analysis. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, *92*(10), 1513-1521.

Ahmadi, O., Mortazavi, S. B., Mahabadi, H. A., & Hosseinpouri, M. (2020). Development of a dynamic quantitative risk assessment methodology using fuzzy DEMATEL-BN and leading indicators. *Process Safety and Environmental Protection*, *142*, 15-44.

Ahmed, S., Li, T., Huang, S., & Cao, J. (2023). Dynamic and quantitative risk assessment of Cruise ship pod propulsion system failure: An integrated Type-2 Fuzzy-Bayesian approach. *Ocean Engineering*, *279*, 114601.

Ait Ouffroukh L, Chaib R, Ion V, Khochmane L. Analysis of risk and the strengthening of the safety technical barriers: application of Skikda (Algeria) oil refining complex. *World J Eng.* 2018;15:99-109.

Aitouche, S., Kaanit, A., and Mouss, K. (2011). Consideration of Disturbances for the Analysis and Design of A Production System. *Journal of Engineering Science and Technology*, 1(1): 92-103.

Al-Shanini, A., Ahmad, A., & Khan, F. (2014). Accident modelling and analysis in process industries. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, *32*, 319-334.

Amin, M. T., & Khan, F. (2022). Dynamic process safety assessment using adaptive Bayesian network with loss function. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, *61*(45), 16799-16814.

Amin, M. T., Khan, F., & Amyotte, P. (2019). A bibliometric review of process safety and risk analysis. *Process Safety and Environmental Protection*, *126*, 366-381.

API 2218 2nd Edition, (1999). Fireproofing Practices in Petroleum and Petrochemical Processing Plants, API Publishing Services, Washington, D.C., USA.

ARAMIS, I. D. (2004). Développement d'une méthode intégrée d'analyse des risques pour la prévention des accidents majeurs. *Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable–INERIS*.

Arici, S. S., Akyuz, E., & Arslan, O. (2020). Application of fuzzy bow-tie risk analysis to maritime transportation: The case of ship collision during the STS operation. *Ocean Engineering*, *217*, 107960.

Badida, P., Balasubramaniam, Y., & Jayaprakash, J. (2019). Risk evaluation of oil and natural gas pipelines due to natural hazards using fuzzy fault tree analysis. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, *66*, 284-292.

Badreddine, A., Romdhane, T.B., HajKacem, M.A.B. and Amor, N.B., (2014). A new multi-objectives approach to implement preventive and protective barriers in bow tie diagram. *Journal of Loss Prevention in the process Industries*, *32*, pp.238-253.

Bai, Y., Wu, J., Ren, Q., Jiang, Y., & Cai, J. (2023). A BN-based risk assessment model of natural gas pipelines integrating knowledge graph and DEMATEL. *Process Safety and Environmental Protection*, *171*, 640-654.

Bahmed, L., Daas, S., Chebila, M., & Aggabou, L. K. (2016). Contribution to Multi-Criteria Evaluation of the Impacts of Air Pollution: Case of Cement Plant (Ain Touta-ALGERIA). *Energy, Transportation and Global Warming*, 451-461.

Baybutt, P. (2014). The use of risk matrices and risk graphs for SIL determination. *Process Safety Progress*, *33*(2), 179-182.

Beck, E. (2006). Approche multi-risques en milieu urbain. *Le cas des risques sismique et technologiques dans l'agglomération de Mulhouse (Haut-Rhin).*

Beck, E., & Glatron, S. (2009). Vulnérabilité socio-spatiale aux risques majeurs : l'approche du géographe. *Risques et environnement : recherches interdisciplinaires sur la vulnérabilité des sociétés. Paris, L'Harmattan*, 331-346.

Benahmed A., Benzerga S., Daas S., Bahmed L., (2015). Contribution à l'évaluation multicritere de la robustesse des plans de secours industriels des zones à risques majeurs en Algérie. 1ere Conférence International sur la Sureté Interne d'Etablissement (CISIE'1-2015).

Bonnet, E., Zimmermann, É., & Saint-Gérand, T. (2006). SIG et risques industriels : conception et création d'informations spatialisées pour l'aide à la concertation. *Géographes associés*, *30*(1), 105-129.

Berdouzi, F., Villemur, C., Olivier-Maget, N., & Gabas, N. (2018). Dynamic simulation for risk analysis: Application to an exothermic reaction. *Process Safety and Environmental Protection*, *113*, 149-163.

Bubbico, R., Lee, S., Moscati, D., & Paltrinieri, N. (2020). Dynamic assessment of safety barriers preventing escalation in offshore Oil&Gas. *Safety Science*, *121*, 319-330.

Buckley, J. J. (1985). Fuzzy hierarchical analysis. *Fuzzy sets and systems*, *17*(3), 233-247.

Bulinge, F. (2002). L'équation de la sécurité, une analyse systémique des vulnérabilités de l'entreprise : vers un outil de gestion des risques. *Informations, Savoirs, Décisions et Médiations [Informations, Sciences for Decisions Making]*, 19-27.

Butchvarov, P. (1960). The concept of possibility. *Philosophy and Phenomenological Research*, *20*(3), 318-337.

Cai, B., Li, W., Liu, Y., Shao, X., Zhang, Y., Zhao, Y., & Liu, Y. (2021). Modeling for evaluation of safety-instrumented systems with heterogeneous components. *Reliability Engineering & System Safety*, *215*, 107823.

CCPS, (1994). Guidelines for evaluating the characteristics of vapor cloud explosions, flash fires and BLEVEs. New York: AIChE, (1994).

CCPS, (2001). Layer of protection analysis. Simplified process risk assessment. Center for chemical process safety of the American institute of chemical engineers, New York.

Celik, E., Gul, M., Aydin, N., Gumus, A. T., & Guneri, A. F. (2015). A comprehensive review of multi criteria decision-making approaches based on interval type-2 fuzzy sets. *Knowledge-Based Systems*, *85*, 329-341.

Chang, D. Y. (1992). Extent analysis and synthetic decision. *Optimization techniques and applications*, *1*(1), 352-355.

Chettouh S, Hamzi R, Benaroua K. Examination of fire and related accidents in Skikda Oil Refinery for the period 2002–2013. J Loss Prev Proc Ind. 2016; 4:186-193.

Clemen, R. T., & Winkler, R. L. (1999). Combining probability distributions from experts in risk analysis. *Risk analysis*, *19*, 187-203.

Chachra, A., Kumar, A., & Ram, M. (2023). Intuitionistic fuzzy approach to reliability assessment of multi-state systems. *Mathematics and Computers in Simulation*, *212*, 489-503.

Chen, S. M., & Wang, C. Y. (2013). Fuzzy decision making systems based on interval type-2 fuzzy sets. *Information sciences*, *242*, 1-21.

Chen, Y. (2019). Study on centroid type-reduction of interval type-2 fuzzy logic systems based on noniterative algorithms. *Complexity*, *2019*, 1-12.

Chen, C., Khakzad, N., & Reniers, G. (2020). Dynamic vulnerability assessment of process plants with respect to vapor cloud explosions. *Reliability Engineering & System Safety*, *200*, 106934.

Chen, S. M., & Lee, L. W. (2010). Fuzzy multiple attributes group decision-making based on the ranking values and the arithmetic operations of interval type-2 fuzzy sets. *Expert Systems with applications*, *37*(1), 824-833.

Chen, K., Wei, X., Li, H., & Wang, W. (2020, November). Risk analysis of gaseous SO 3 sulfonation reactor system based on HAZOP-LOPA. In *2020 IEEE 3rd International Conference of Safe Production and Informatization (IICSPI)* (pp. 361-365). IEEE.

Chen, G., Luo, C., Zhou, L., & Rao, X. (2023). Research on three-dimensional visualization system of Natech events triggered domino accidents in oil-gas depots. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 81, 104953.

Chen, C., Reniers, G., & Khakzad, N. (2019). Integrating safety and security resources to protect chemical industrial parks from man-made domino effects: a dynamic graph approach. *Reliability engineering & system safety*, *191*, 106470.

Cheng, J., Wang, B., Cao, C., & Lang, Z. (2023). A Quantitative Risk Assessment Model for Domino Accidents of Hazardous Chemicals Transportation. Processes, 11(5), 1442.

Cheliyan, A. S., & Bhattacharyya, S. K. (2018). Fuzzy fault tree analysis of oil and gas leakage in subsea production systems. *Journal of Ocean Engineering and Science*, *3*(1), 38-48.

Cozzani, V., Tugnoli, A., & Salzano, E. (2009). The development of an inherent safety approach to the prevention of domino accidents. *Accident Analysis & Prevention*, *41*(6), 1216-1227.

Daas S., Bahmed L., (2014, a). Contribution à l'étude de rapport des outils d'aide à la décision dans la gestion des crises au niveau du territoire urbain de Hassi Messaoud. International conference on

Engineering of industrial Safety and Environment (ICISE'14), 26th- 27th of January 2014, Oran, Algeria.

Daas S., Bahmed L., (2014, b). Apport de l'approche multicritere dans l'évaluation des barrières de sécurité et l'anticipation des crises industrielles. Cas de l'unité GPL/ ZCINA, Hassi Messaoud. 1er Workshop sur la promotion des systèmes de sécurité dans les zones pétrolières et gazières (WSZP- 2014). 3-4 Décembre 2014.

Daas S. Bahmed L., (2015). Apport de la logique floue dans l'évaluation de la Vulnérabilité d'un site industriel vis à vis des risques liés à la sureté interne d'établissement. 1ere Conférence International sur la Sureté Interne d'Etablissement (CISIE'1-2015).

Daas S, Innal F. (2018). Contribution of the artificial intelligence for failure risk assessment of a surveillance system for the emergency response. The first International Conference on Artificial Intelligence and its Application, AIAP'18. El Oued, Algeria, December 04-05, 2018.

Daas S, (2020). La réglementation et norme en HSE. Support de cours destiné aux 2 éme année TCM. Institut d'hygiène et sécurité, Université Batna 2. (https://staff.univ-batna2.dz/sites/default/files/daas samia/files/cours_reglementation_et_norme_en_hse._2_eme_annee_mme_s._daas.pdf)

Daas S, Innal F. (2023, a). Unavailability Assessment based on Improved Dependent Uncertain Ordered Weighted Averaging Operator and Fault Tree Analysis. International Journal of Quality Reliability and Safety Engineering. https://doi.org/10.1142/S0218539323500183

Daas S, Innal F., (2023, b). Failure probability assessment of emergency safety barriers integrating an extension of event tree analysis and Fuzzy type-2 analytic hierarchy process. *Systems Engineering*. 2023;1-19. https://doi.org/10.1002/sys.21668

Daas S., and Innal F., (2023, c). "An extension of the failure mode effects and criticality analysis with fuzzy analytical hierarchy process method to assess the emergency safety barriers". *International Journal of Industrial Engineering: Theory, Applications and Practice* 30 (2). https://doi.org/10.23055/ijietap.2023.30.2.8519

Daas S, Innal F. (2023, d). Optimization the Reliability of Emergency Safety Barriers based on the Subjective Safety Analysis and Evidential Reasoning Theory. Case Study. International Journal of Quality & Reliability Management. DOI: 10.1108/IJQRM-11-2022-0336

Daas S, Innal F. (2024, e). Reliability assessment of emergency safety barriers based on an intuitionistic fuzzy sets aggregation procedure and subjective safety analysis. A case study. International Journal of System Assurance, Engineering and Management (In progress).

Dauphiné, A., & Provitolo, D. (2007). La résilience : un concept pour la gestion des risques. In *Annales de géographie* (Vol. 654, No. 2, pp. 115-125). Armand Colin.

Dautun, C., Tixier, J., Chapelain, J., Fontaine, F., & Dusserre, G. (2007, May). Crisis management: improvement of knowledge and development of a decision aid process. In *12. International Symposium on Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industry* (p. 6). IChemE.

De Ruijter, A. and Guldenmund, F., (2016). The bowtie method: A review. *Safety science*, *88*, pp.211-218.

De Dianous, V., & Fiévez, C. (2006). ARAMIS project: A more explicit demonstration of risk control through the use of bow–tie diagrams and the evaluation of safety barrier performance. *Journal of Hazardous Materials*, *130*(3), 220-233.

Desroches, A., Leroy, A., & Vallée, F. (2003). La gestion des risques : principes et pratiques, volume 1. Lavoisier, France.

Di Bona, G., Forcina, A., Petrillo, A., De Felice, F., & Silvestri, A. (2016). A-IFM reliability allocation model based on multicriteria approach. *International Journal of Quality & Reliability Management*.

Di Maio, F., Marchetti, S., & Zio, E. (2023). Robust multi-objective optimization of safety barriers performance parameters for NaTech scenarios risk assessment and management. *Reliability Engineering & System Safety*, *235*, 109245.

Ding, L., Ji, J., Khan, F., Li, X., & Wan, S. (2020). Quantitative fire risk assessment of cotton storage and a criticality analysis of risk control strategies. *Fire and Materials*, *44*(2), 165-179.

Duijm, N. J. (2009). Safety-barrier diagrams as a safety management tool. *Reliability Engineering & System Safety*, *94*(2), 332-341.

Dubois-Maury, J., & Chaline, C. (2004). Urban risk. *EditionArmand colin*.

Efe, B. (2019). Analysis of Operational Safety Risks in Shipbuilding Using Failure Mode and Effect Analysis Approach. *Ocean Engineering*, *187*, 106214.Fattor, M. V., & Vieira, M. G. A. (2019). Application of human HAZOP technique adapted to identify risks in Brazilian waste pickers' cooperatives. *Journal of environmental management*, *246*, 247-258.

Ferdous, R., Khan, F., Sadiq, R., Amyotte, P., & Veitch, B. (2009). Handling data uncertainties in event tree analysis. *Process safety and environmental protection*, *87*(5), 283-292.

Forcina, A., Silvestri, L., Di Bona, G., & Silvestri, A. (2020). Reliability allocation methods: A systematic literature review. *Quality and Reliability Engineering International*, *36*(6), 2085-2107.

Gao, J., Zhang, H., Wang, Q., & Min, G. (2022, February). Safety risk evaluation of aviation system based on fuzzy evidential reasoning method. In *Sixth International Conference on Electromechanical Control Technology and Transportation (ICECTT 2021)* (Vol. 12081, pp. 896-905). SPIE.

Gabus, A., & Fontela, E. (1973). Perceptions of the world problematique: Communication procedure, communicating with those bearing collective responsibility.

Ghasemi, F., & Rahimi, J. (2023). Failure mode and Effect Analysis of personal fall arrest system under the intuitionistic fuzzy environment. *Heliyon*

Gilbert, C. (2002). La fin des risques?. *Quaderni*, *48*(1), 111-120.

Glatron, S., & Beck, E. (2008). Evaluation of socio-spatial vulnerability of citydwellers and analysis of risk perception: industrial and seismic risks in Mulhouse. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, *8*(5), 1029-1040.

Grembo, N. (2010). Risque industriel et représentation des risques: approche géographique de la représentation du risque industriel majeur en région Poitou-Charentes (Doctoral dissertation, Université de La Rochelle).

Griot, C., Sauvagnargues-Lesage, S., Dusserre, G., Pearson, D., & Picheral, H. (2002). Vulnérabilité face aux risques liés au transport de matières dangereuses : apports de deux méthodes multicritères d'aide à la décision. *Environnement, Ingénierie & Développement*.

Guetarni, I. H., Aissani, N., Châtelet, E., & Lounis, Z. (2019). Reliability analysis by mapping probabilistic importance factors into bayesian belief networks for making decision in water deluge system. *Process Safety Progress*, *38*(2), e12011.

Guo, X., Ji, J., Khan, F., Ding, L., & Yang, Y. (2021). Fuzzy Bayesian network based on an improved similarity aggregation method for risk assessment of storage tank accident. *Process Safety and Environmental Protection*, *149*, 817-830.

Guo, X., Ding, L., Ji, J., & Cozzani, V. (2022). A cost-effective optimization model of safety investment allocation for risk reduction of domino effects. *Reliability Engineering & System Safety*, *225*, 108584.

Halloul, Y., Chiban, S., & Awad, A. (2019). Adapted fuzzy fault tree analysis for oil storage tank fire. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, *41*(8), 948-958.

Han, Y., Zhen, X., Huang, Y., & Vinnem, J. E. (2019). Integrated methodology for determination of preventive maintenance interval of safety barriers on offshore installations. *Process Safety and Environmental Protection*, *132*, 313-324.

Hosseini, N., Givehchi, S., & Maknoon, R. (2020). Cost-based fire risk assessment in natural gas industry by means of fuzzy FTA and ETA. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, *63*, 104025.

He, R., Li, X., Chen, G., Wang, Y., Jiang, S., & Zhi, C. (2018). A quantitative risk analysis model considering uncertain information. *Process Safety and Environmental Protection*, *118*, 361-370.

Heijungs, R., & Guinée, J. B. (2007). Allocation and 'what-if'scenarios in life cycle assessment of waste management systems. *Waste management*, *27*(8), 997-1005.

Holland, W. R. (1997). The high school principal and barriers to change: The need for principal credibility. *NASSP Bulletin*, *81*(585), 94-98.

Hong, E. S., Lee, I. M., Shin, H. S., Nam, S. W., & Kong, J. S. (2009). Quantitative risk evaluation based on event tree analysis technique: Application to the design of shield TBM. *Tunnelling and Underground Space Technology*, *24*(3), 269-277.

Hong, Y., Pasman, H. J., Quddus, N., & Mannan, M. S. (2020). Supporting risk management decision making by converting linguistic graded qualitative risk matrices through interval type-2 fuzzy sets. *Process safety and environmental protection*, *134*, 308-322.

Hong, B., Shao, B., Guo, J., Fu, J., Li, C., & Zhu, B. (2023). Dynamic Bayesian network risk probability evolution for third-party damage of natural gas pipelines. *Applied Energy*, *333*, 120620.

Hourtolou, D. (2002). Risk analysis and prevention of major accidents (DRA-007). Final report-Operation a. ASSURANCE-ASSessment of the Uncertainties in Risk Analysis of Chemical Establishments, Project UE ENV4-CT97-0627.

Hsu, H. M., & Chen, C. T. (1996). Aggregation of fuzzy opinions under group decision making. *Fuzzy sets and systems*, *79*(3), 279-285.

I.I. INC, API 2510, (2010). A Fire-Protection Considerations for the Design and Operation of Liquefied Petroleum Gas (LPG) Storage Facilities, American Petroleum Institute, USA.

Ikwan, F., Sanders, D., & Hassan, M. (2021). Safety evaluation of leak in a storage tank using fault tree analysis and risk matrix analysis. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, *73*, 104597.

Innal, F., Dutuit, Y., & Chebila, M. (2015). Safety and operational integrity evaluation and design optimization of safety instrumented systems. *Reliability Engineering & System Safety*, *134*, 32-50.

Innal, F., Lundteigen, M. A., Liu, Y., & Barros, A. (2016). PFDavg generalized formulas for SIS subject to partial and full periodic tests based on multi-phase Markov models. *Reliability Engineering & System Safety*, *150*, 160-170.

ISO/IEC 45001, (2018). Systèmes de management de la santé et de la sécurité au travail - Exigences et lignes directrices pour leur utilisation.

ISO/IEC 31000, (2018). Management du risque – Lignes directrices.

ISO/IEC 73, (2002). Management du risque. Vocabulaire, lignes directrice. ISO/IEC 31010, (2019). Gestion des risques - Techniques d'évaluation des risques.

ISO/IEC 61511, (2003). Sécurité fonctionnelle - Systèmes instrumentés de Sécurité pour le domaine de la production pour processus – Parties 1 à 3, janvier 2003- juillet 2003. Commission Electrotechnique Internationale, Genève, Suisse.

ISO/IEC 61508. (1998). Functional of electrical/electronic/programmable electronic (E/E/EP) safety related systems. International Standards Organisation, Geneva.

ISO/IEC 61882, (2016). Hazard and operability studies (HAZOP studies) – Application guide.

ISO/ IEC 60812 (2018). Failure modes and effects analysis (FMEA and FMECA).

ISO/ IEC (2010). 62502, Analysis Techniques for Dependability-Event Tree Analysis (ETA).

Ivančan, J., Lisjak, D., Pavletić, D., & Kolar, D. (2023). Improvement of Failure Mode and Effects Analysis Using Fuzzy and Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System. *Machines*, *11*(7), 739.

Jianxing, Y., Haicheng, C., Yang, Y., & Zhenglong, Y. (2019). A weakest t-norm based fuzzy fault tree approach for leakage risk assessment of submarine pipeline. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, *62*, 103968.

Johansen, I. L., & Rausand, M. (2015). Barrier management in the offshore oil and gas industry. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, *34*, 49-55.

JORA n° 36, 1985. Décret exécutif n° 85-231 du 25 août 1985, fixant les conditions et les modalités d'organisation et de mise en œuvre des interventions et secours en cas de catastrophes.

JORA n° 84, 2004. La loi n° 04-20 du 25 décembre 2004 relative à la prévention des risques majeurs et à la gestion des catastrophes dans le cadre du développement durable.

JORA n° 37, 2006. Décret exécutif n° 06-198 du 31 mai 2006 définissant la réglementation applicable aux établissements classés pour la protection de l'environnement.

JORA n° 60, 2009. Décret exécutif n° 09-335 du au 20 octobre 2009, fixant les modalités d'élaboration et de mise en œuvre des plans internes d'intervention par les exploitants des installations industrielles.

JORA n° 9, 2015. Décret exécutif n°15-71 du 11 février 2015 fixant les conditions et modalités d'élaboration et d'adoption des Plans Particuliers d'Intervention pour les installations ou ouvrages.

Kabir, S. (2023). A fuzzy data-driven reliability analysis for risk assessment and decision making using Temporal Fault Trees. *Decision Analytics Journal*, 100265.

Kabir, S., Taleb-Berrouane, M., & Papadopoulos, Y. (2023). Dynamic reliability assessment of flare systems by combining fault tree analysis and Bayesian networks. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, *45*(2), 4305-4322.

Kadri, F., Chatelet, E., & Lallement, P. (2013). The assessment of risk caused by fire and explosion in chemical process industry: a domino effect-based study. *Journal of risk analysis and crisis response*, *3*(2).

Kahraman, C., Öztayşi, B., Sarı, İ. U., & Turanoğlu, E. (2014). Fuzzy analytic hierarchy process with interval type-2 fuzzy sets. *Knowledge-Based Systems*, *59*, 48-57.

Karagiannis, G. M. (2010). *Méthodologie pour l'analyse de la robustesse des plans de secours industriels* (Doctoral dissertation, Saint-Etienne, EMSE).

Kennedy, R., & Kirwan, B. (1996). The Safety Culture HAZOP: An inductive and group based approach to identifying Safety Culture vulnerabilities. *Probabilistic Safety Assessment and Management'96: ESREL'96--PSAM-III, June 24-28, 1996, Crete, Greece*, *2*, 910.

Khare, V., Nema, S., & Baredar, P. (2019). Reliability analysis of hybrid renewable energy system by fault tree analysis. *Energy & Environment*, *30*(3), 542-555.

Kalilainen, J., & Lind, T. (2022). Uncertainty quantification study on gas phase iodine release from Fukushima Daiichi accident in unit 3. *Annals of Nuclear Energy*, *166*, 108740.

Kaur, P. (2014). Selection of vendor based on intuitionistic fuzzy analytical hierarchy process. *Advances in operations research*, *2014*.

Khan, F. I., & Abbasi, S. A. (1997). OptHAZOP—an effective and optimum approach for HAZOP study. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, *10*(3), 191-204.

Khan, F. I. (2005, October). Knowledge-based expert system framework to conduct offshore process HAZOP study. In *2005 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics* (Vol. 3, pp. 2274-2280). IEEE.

Khan, F., Rathnayaka, S., & Ahmed, S. (2015). Methods and models in process safety and risk management: Past, present and future. *Process safety and environmental protection*, *98*, 116-147.

Khakzad, N., Khan, F., & Amyotte, P. (2013). Quantitative risk analysis of offshore drilling operations: A Bayesian approach. *Safety science*, *57*, 108-117.

Kim, H., Koh, J. S., Kim, Y., & Theofanous, T. G. (2005). Risk assessment of membrane type LNG storage tanks in Korea-based on fault tree analysis. *Korean Journal of Chemical Engineering*, *22*, 1-8.

Kumar, M., & Yadav, S. P. (2012). The weakest t-norm based intuitionistic fuzzy fault-tree analysis to evaluate system reliability. *ISA transactions*, *51*(4), 531-538.

Kumar, M., & Kaushik, M. (2020). System failure probability evaluation using fault tree analysis and expert opinions in intuitionistic fuzzy environment. *Journal of loss prevention in the process industries*, *67*, 104236

Kumar, M., & Singh, K. (2022). Fuzzy fault tree analysis of chlorine gas release hazard in Chlor-Alkali industry using α-cut interval-based similarity aggregation method. *Applied Soft Computing*, *125*, 109199.

Kumar, M., Singh, S. B., & Kumar, D. (2023). System reliability analysis based on Pythagorean fuzzy set. *International Journal of Mathematics in Operational Research*, *24*(2), 253-285.

Kuzucuoğlu, D., Koc, K., Kazar, G., & Tokdemir, O. B. (2023). Prioritization of risk mitigation strategies for contact with sharp object accidents using hybrid bow-tie approach. *Safety Science*, *166*, 106248.

Kuswandari, R. (2004, March). Assessment of different methods for measuring the sustainability of forest management. ITC.

Kuzu, A. C. (2023). Application of fuzzy DEMATEL approach in maritime transportation: A risk analysis of anchor loss. *Ocean Engineering*, *273*, 113786.

Laal, F., Pouyakian, M., Jafari, M. J., Nourai, F., Hosseini, A. A., & Khanteymoori, A. (2020). Technical, human, and organizational factors affecting failures of firefighting systems (FSs) of atmospheric storage tanks: providing a risk assessment approach using Fuzzy Bayesian Network (FBN) and content validity indicators. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, *65*, 104157.

Lagadec, P., & Guilhou, X. (2002). Les conditions de survenue des crises graves. *Conditions et mécanismes de production des défaillances, accidents et crises*, 157-210.

Landucci, G., Argenti, F., Tugnoli, A., & Cozzani, V. (2015). Quantitative assessment of safety barrier performance in the prevention of domino scenarios triggered by fire. *Reliability Engineering & System Safety*, *143*, 30-43.

Lavasani, S. M., Ramzali, N., Sabzalipour, F., & Akyuz, E. (2015). Utilisation of Fuzzy Fault Tree Analysis (FFTA) for quantified risk analysis of leakage in abandoned oil and natural-gas wells. *Ocean Engineering*, *108*, 729-737.

Lee, H. S. (1999, October). An optimal aggregation method for fuzzy opinions of group decision. In *IEEE SMC'99 Conference Proceedings. 1999 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (Cat. No. 99CH37028)* (Vol. 3, pp. 314-319). IEEE.

Leoni, L., & De Carlo, F. (2023). Integration of fuzzy reliability analysis and consequence simulation to conduct risk assessment. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, *83*, 105081.

Liaw, C. S., Chang, Y. C., Chang, K. H., & Chang, T. Y. (2011). ME-OWA based DEMATEL reliability apportionment method. *Expert Systems with Applications*, *38*(8), 9713-9723.

Liang, Q., & Mendel, J. M. (2000). Interval type-2 fuzzy logic systems: theory and design. *IEEE Transactions on Fuzzy systems*, *8*(5), 535-550.

Liang, Q., Karnik, N. N., & Mendel, J. M. (2000). Connection admission control in ATM networks using survey-based type-2 fuzzy logic systems. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, *30*(3), 329-339.

Lievens C., (1976). Sécurité des systèmes. *Cepadues éditions*, Toulouse, France.

Liu, Y. (2020). Safety barriers: Research advances and new thoughts on theory, engineering and management. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, *67*, 104260.

Liu, Y., Wang, S., Liu, Q., Liu, D., Yang, Y., Dan, Y., & Wu, W. (2022). Failure Risk Assessment of Coal Gasifier Based on the Integration of Bayesian Network and Trapezoidal Intuitionistic Fuzzy Number-Based Similarity Aggregation Method (TpIFN-SAM). *Processes*, *10*(9), 1863.

Liu, Y., Fan, Z.P., Yuan, Y. & Li, H., (2014). A FTA-based method for risk decision-making in emergency response. *Computers & Operations Research*, (42): 49-57.

Li, Y., Liu, P., & Wu, X. (2023). Failure mode and effect analysis approach considering risk attitude of dynamic reference point cumulative prospect theory in uncertainty contexts. *Artificial Intelligence Review*, 1-48.

Li, J., Reniers, G., Cozzani, V., & Khan, F. (2017). A bibliometric analysis of peer-reviewed publications on domino effects in the process industry. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, *49*, 103-110.

Lu, C., Lan, J., & Wang, Z. (2006). Aggregation of fuzzy opinions under group decision-making based on similarity and distance. *Journal of Systems Science and Complexity*, *19*, 63-71.

Ma, L., Ma, X., Lan, H., Liu, Y., & Deng, W. (2022). A data-driven method for modeling human factors in maritime accidents by integrating DEMATEL and FCM based on HFACS: A case of ship collisions. *Ocean Engineering*, *266*, 112699.

Mahdinia, M., Mohammadfam, I., Soltanzadeh, A., Aliabadi, M. M., & Aghaei, H. (2023). A fuzzy Bayesian network DEMATEL model for predicting safety behavior. *International journal of occupational safety and ergonomics*, *29*(1), 36-43.

Maillard, D. (2002). *Maîtrise de l'urbanisation autour des sites industriels à haut risque* (Doctoral dissertation).

Marques, F. H., & Alvarez, L. A. (2023). Model Predictive Control with Safety Constraint Embedded in Hazard and Operability Study. *Chemical Engineering Transactions*, *99*, 637-642.

Margossian, N. (2006). *Risques et accidents industriels majeurs: Caractéristiques, réglementation, prévention*. Dunod.

Markert, F., Duijma, N. J., & Thommesen, J. (2013). Modelling of safety barriers including human and organisational factors to improve process safety. *Chem. Eng*, *31*.

Masalegooyan, Z., Piadeh, F., & Behzadian, K. (2022). A comprehensive framework for risk probability assessment of landfill fire incidents using fuzzy fault tree analysis. *Process Safety and Environmental Protection*, *163*, 679-693.

Medonos, S., & Raman, R. (2008). Why ISO 13702 and NFPA 15 standards may lead to unsafe design. European Safety and Reliability Conference (ESREL 2003).

Mendel, J. M., John, R. I., & Liu, F. (2006). Interval type-2 fuzzy logic systems made simple. *IEEE transactions on fuzzy systems*, *14*(6), 808-821.

Mengual, M., (2010). *Aide à la décision et expertise en gestion des risques*. Lavoisier.

Meng, H., Kloul, L., & Rauzy, A. (2018). Modeling patterns for reliability assessment of safety instrumented systems. *Reliability Engineering & System Safety*, *180*, 111-123.

Misuri, A., Ricci, F., Sorichetti, R., & Cozzani, V. (2023). The Effect of Safety Barrier Degradation on the Severity of Primary Natech Scenarios. *Reliability Engineering & System Safety*, *235*, 109272.

Mocellin, P., De Tommaso, J., Vianello, C., Maschio, G., Saulnier-Bellemare, T., Virla, L. D., & Patience, G. S. (2022). Experimental methods in chemical engineering: Hazard and operability analysis—HAZOP. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, *100*(12), 3450-3469.

Nguyen, H. T., Safder, U., Kim, J., Heo, S., & Yoo, C. (2022). An adaptive safety-risk mitigation plan at process-level for sustainable production in chemical industries: An integrated fuzzy-HAZOP-best-worst approach. *Journal of Cleaner Production*, *339*, 130780.

Omidvari, M., Lavasani, S. M. R., & Mirza, S. (2014). Presenting of failure probability assessment pattern by FTA in Fuzzy logic (case study: Distillation tower unit of oil refinery process). *Journal of Chemical Health & Safety*, *21*(6), 14-22.

Onisawa, T. (1988). A representation of human reliability using fuzzy concepts. *Information Sciences*, *45*(2), 153-173.

Ovidi, F., Zhang, L., Landucci, G., & Reniers, G. (2021). Agent-based model and simulation of mitigated domino scenarios in chemical tank farms. *Reliability Engineering & System Safety*, *209*, 107476.

Panchal, D. (2023). Reliability analysis of turbine unit using Intuitionistic Fuzzy Lambda-Tau approach. *Reports in Mechanical Engineering*, *4*(1), 47-61.

Park, B., Kim, Y., Lee, K., Paik, S., & Kang, C. (2021). Risk assessment method combining independent protection layers (IPL) of layer of protection analysis (LOPA) and RISKCURVES software: Case study of hydrogen refueling stations in Urban Areas. *Energies*, *14*(13), 4043.

Patil, S. K., & Kant, R. (2013). A fuzzy DEMATEL method to identify critical success factors of knowledge management adoption in supply chain. *Journal of Information & Knowledge Management*, *12*(03), 1350019.

Perinet, R. (2009). La méthode Oméga 20. *Rapport Scientifique INERIS*, *2008*, 77-79.

PERILHON, P. (2003). MOSAR-Présentation de la méthode.

Pouyakian, M., Jafari, M. J., Laal, F., Nourai, F., & Zarei, E. (2021). A comprehensive approach to analyze the risk of floating roof storage tanks. *Process Safety and Environmental Protection*, *146*, 811-836.

Propeck-Zimmermann, E., Saint-Gérand, T., & Bonnet, E. (2007). Probabilités, risques et gestion territoriale: champs d'action des PPRT. *Géocarrefour*, *82*(1-2), 65-76.

Propeck-Zimmermann, E., Saint-Gérand, T., & Bonnet, E. (2007). Probabilités, risques et gestion territoriale: champs d'action des PPRT. *Géocarrefour*, *82*(1-2), 65-76.

Propeck-Zimmermann, E. (2005). *Risques: normes, seuils, limites et expertises* (No. 42, pp. 238-p). Maison de la recherche en sciences humaines.

PSA, 2013. Principles for Barrier Management in the Petroleum Industry (Technical Report). Petroleum Safety Authority Norway.

Rajakarunakaran, S., Kumar, A. M., & Prabhu, V. A. (2015). Applications of fuzzy faulty tree analysis and expert elicitation for evaluation of risks in LPG refuelling station. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, *33*, 109-123.

Ramzali, N., Lavasani, M. R. M., & Ghodousi, J. (2015). Safety barriers analysis of offshore drilling system by employing Fuzzy Event Tree Analysis. *Safety science*, *78*, 49-59.

Rauzy, A. (1993). New algorithms for fault trees analysis. *Reliability Engineering & System Safety*, *40*(3), 203-211.

RAUSAND, M. R. M. (2015). Technology qualification program integrated with product development process. *International Journal of Performability Engineering*, *11*(1), 3.

Reason, J. (1995). A systems approach to organizational error. *Ergonomics*, *38*(8), 1708-1721.

Reason, J. (2016). *Managing the risks of organizational accidents*. Routledge.

Renjith, V. R., Madhu, G., Nayagam, V. L. G., & Bhasi, A. B. (2010). Two-dimensional fuzzy fault tree analysis for chlorine release from a chlor-alkali industry using expert elicitation. *Journal of hazardous materials*, *183*(1-3), 103-110.

Rodriguez, D. J. C., Pilone, E., Camuncoli, G., & Demichela, M. (2023). Implementation of a Natech Vulnerability Index in a Seveso Plant. *Chemical Engineering Transactions*, *100*, 43-48.

Roux-Dufort, C. (2003). *Gérer et décider en situation de crise: outils de diagnostic, de prévention et de décision* (No. hal-02298039).

Rossing, N. L., Lind, M., Jensen, N., & Jørgensen, S. B. (2010). A functional HAZOP methodology. *Computers & chemical engineering*, *34*(2), 244-253.

Ruijters, E., & Stoelinga, M. (2015). Fault tree analysis: A survey of the state-of-the-art in modeling, analysis and tools. *Computer science review*, *15*, 29-62.

Saaty, T. L. (1985). Decision making for leaders. *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics*, (3), 450-452.

Saaty, T. L. (2004). Decision-making—the analytic hierarchy and network processes (AHP/ANP). *Journal of systems science and systems engineering*, *13*, 1-35.

Saaty, T. L., & Shang, J. S. (2011). An innovative orders-of-magnitude approach to AHP-based mutli-criteria decision making: Prioritizing divergent intangible humane acts. *European Journal of Operational Research*, *214*(3), 703-715.

Sadiq, R., Saint-Martin, E., & Kleiner, Y. (2008). Predicting risk of water quality failures in distribution networks under uncertainties using fault-tree analysis. *Urban Water Journal*, *5*(4), 287-304.

Sarafraz, P., Varshosaz, K., Orak, N., Jaafarzadeh, N., & Aghajari, E. (2023). Analysis of protective layers by LOPA method and determining the level of process safety integration (SIL) of Equipment in Imam Khomeini Petrochemical Aromatic Unit. *Journal of Advances in Environmental Health Research*, *11*(2).

Simon, C., Sallak, M., & Aubry, J. F. (2007). SIL allocation of SIS by aggregation of experts' opinions. In *Safety and Reliability Conference, ESREL'2007* (pp. 753-761). Taylor and Francis.

Sklet S. Safety barriers: definition, classification, and performance. *J Loss Prev Proc Ind.* 2006;19:494-506.

Song, S., Coit, D. W., Feng, Q., & Peng, H. (2014). Reliability analysis for multi-component systems subject to multiple dependent competing failure processes. *IEEE Transactions on Reliability*, *63*(1), 331-345.

Sorichetti, R., Misuri, A., Di Padova, A., Miglionico, R., Tallone, F., & Cozzani, V. (2022). Multi-risk Approach to the QRA of Natech Scenarios in the Chemical and Process Industry. *Chemical Engineering Transactions*, *91*, 493-498.

Sugeno, M. (1999). *Fuzzy modeling and control: selected works of M. Sugeno*. cRc Press.

Sun, H., Wang, H., Yang, M., & Reniers, G. (2021). Towards limiting potential domino effects from single flammable substance release in chemical complexes by risk-based shut down of critical nearby process units. *Process Safety and Environmental Protection*, *148*, 1292-1303.

Tacnet, J. M. (2009). Prise en compte de l'incertitude dans l'expertise des risques naturels en montagne par analyse multicritères et fusion d'information (Doctoral dissertation, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne).

Tang, Y., Tan, S., & Zhou, D. (2023). An improved failure mode and effects analysis method using belief Jensen–Shannon divergence and entropy measure in the evidence theory. *Arabian Journal for Science and Engineering*, *48*(5), 7163-7176.

Tunçel, A. L., Akyuz, E., Arslan, O., Turan, O., & Kurt, R. E. (2023). An extended fuzzy bow-tie approach with SLIM to assess risk for anchor dredging in cargo ships. *Ocean Engineering*, *284*, 115301.

Van Laarhoven, P. J., & Pedrycz, W. (1983). A fuzzy extension of Saaty's priority theory. *Fuzzy sets and Systems*, *11*(1-3), 229-241.

Van Wingerden, K. (2000). Mitigation of gas explosions using water deluge. *Process Safety Progress*, *19*(3), 173-178.

Vinnem, J. E. (2010). Risk indicators for major hazards on offshore installations. *Safety science*, *48*(6), 770- Wang, J. B. Y. J., Yang, J. B., & Sen, P. (1995). Safety analysis and synthesis using fuzzy sets and evidential reasoning. *Reliability Engineering & System Safety*, *47*(2), 103-118.

Wang, J. (2000). A subjective modelling tool applied to formal ship safety assessment. *Ocean Engineering*, *27*(10), 1019-1035.

Wang, H., Lu, X., Du, Y., Zhang, C., Sadiq, R., & Deng, Y. (2017). Fault tree analysis based on TOPSIS and triangular fuzzy number. *International journal of system assurance engineering and management*, *8*, 2064-2070.

Wang, D., Liang, P., Yu, Y., Fu, X., & Hu, L. (2019). An integrated methodology for assessing accident probability of natural gas distribution station with data uncertainty. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, *62*, 103941.

Wang, J., Hu, D., Peng, C., Zhi, H., & Wu, L. (2023). Safety assessment through HAZOP-LOPA-SIL analysis implementation in the DPA demulsifier production process. *Process Safety Progress*, *42*(1), 38-47.

Wu, D., & Mendel, J. M. (2007). Uncertainty measures for interval type-2 fuzzy sets. *Information sciences*, *177*(23), 5378-5393.

Wu, J., Bai, Y., Zhao, H., Hu, X., & Cozzani, V. (2021). A quantitative LNG risk assessment model based on integrated Bayesian-Catastrophe-EPE method. *Safety science*, *137*, 105184.

www.iopg.org

Wybo, J. L. (2012). *Maîtrise des risques et prévention des crises: anticipation, construction de sens, vigilance, gestion des urgences et apprentissage*. Lavoisier.

Xue, L., Fan, J., Rausand, M., & Zhang, L. (2013). A safety barrier-based accident model for offshore drilling blowouts. *Journal of loss prevention in the process industries*, *26*(1), 164-171.

Xu, Q., Xu, K., & Zhou, F. (2020). Safety assessment of casting workshop by cloud model and cause and effect–LOPA to protect employee health. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *17*(7), 2555.

Xu, Y., Reniers, G., Yang, M., Yuan, S., & Chen, C. (2023). Uncertainties and their treatment in the quantitative risk assessment of domino effects: Classification and review. Process Safety and Environmental Protection.

Xie, L., Lundteigen, M. A., & Liu, Y. (2021). Performance analysis of safety instrumented systems against cascading failures during prolonged demands. *Reliability Engineering & System Safety*, *216*, 107975.

Xue, J., Reniers, G., Li, J., Yang, M., Wu, C., & van Gelder, P. H. A. J. M. (2021). A bibliometric and visualized overview for the evolution of process safety and environmental protection. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *18*(11), 5985.

Xu, Z. (2008). Dependent uncertain ordered weighted aggregation operators. *Information Fusion*, *9*(2), 310-316.

Yadav, O. P., & Zhuang, X. (2014). A practical reliability allocation method considering modified criticality factors. *Reliability Engineering & System Safety*, *129*, 57-65.

Yazdi, M. (2017). Hybrid probabilistic risk assessment using fuzzy FTA and fuzzy AHP in a process industry. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, *17*, 756-764.

Yazdi, M. (2018). Risk assessment based on novel intuitionistic fuzzy-hybrid-modified TOPSIS approach. *Safety science*, *110*, 438-448.

Yazdi, M. (2018). Risk assessment based on novel intuitionistic fuzzy-hybrid-modified TOPSIS approach. *Safety science*, *110*, 438-448.

Yazdi, M., Kabir, S., & Walker, M. (2019). Uncertainty handling in fault tree based risk assessment: state of the art and future perspectives. *Process Safety and Environmental Protection*, *131*, 89-104.

Yazdi, M., Korhan, O., & Daneshvar, S. (2020). Application of fuzzy fault tree analysis based on modified fuzzy AHP and fuzzy TOPSIS for fire and explosion in the process industry. *International journal of occupational safety and ergonomics*, *26*(2), 319-335.

Yazdi, M., Nedjati, A., Zarei, E., & Abbassi, R. (2020). A novel extension of DEMATEL approach for probabilistic safety analysis in process systems. *Safety science*, *121*, 119-136.

Yin, H., Liu, C., Wu, W., Song, K., Liu, D., & Dan, Y. (2020). Safety assessment of natural gas storage tank using similarity aggregation method based fuzzy fault tree analysis (SAM-FFTA) approach. *Journal of loss prevention in the process industries*, *66*, 104159.

Yuan, S., Reniers, G., & Yang, M. (2023). Dynamic-risk-informed safety barrier management: An application to cost-effective barrier optimization based on data from multiple sources. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, *83*, 105034.

Yuan, Z., Khakzad, N., Khan, F., Amyotte, P., & Reniers, G. (2013). Risk-based design of safety measures to prevent and mitigate dust explosion hazards. *Industrial & engineering chemistry research*, *52*(50), 18095-18108.

Yuan, S., Yang, M., Reniers, G., Chen, C., & Wu, J. (2022). Safety barriers in the chemical process industries: A state-of-the-art review on their classification, assessment, and management. *Safety science*, *148*, 105647.

Yuan, S., Cai, J., Reniers, G., Yang, M., Chen, C., & Wu, J. (2022). Safety barrier performance assessment by integrating computational fluid dynamics and evacuation modeling for toxic gas leakage scenarios. *Reliability Engineering & System Safety*, *226*, 108719.

Yu, H., Khan, F., & Veitch, B. (2017). A flexible hierarchical Bayesian modeling technique for risk analysis of major accidents. *Risk analysis*, *37*(9), 1668-1682.

Yousofnejad, Y., Afsari, F., & Es' haghi, M. (2023). Dynamic risk assessment of hospital oxygen supply system by HAZOP and intuitionistic fuzzy. *Plos one*, *18*(2), e0280918.

Yu, X., Kong, D., He, X., & Ping, P. (2023). Risk analysis of fire and explosion of hydrogen-gasoline hybrid refueling station based on accident risk assessment method for industrial system. *Fire*, *6*(5), 181.

Zadeh, L. A. (1975). Calculus of fuzzy restrictions. In *Fuzzy sets and their applications to cognitive and decision processes* (pp. 1-39). Academic press.

Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy sets. *Information and control*, *8*(3), 338-353.

Zadeh, L. A. (1978). Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility. *Fuzzy sets and systems*, *1*(1), 3-28.

Zarei, E., Azadeh, A., Khakzad, N., Aliabadi, M. M., & Mohammadfam, I. (2017). Dynamic safety assessment of natural gas stations using Bayesian network. *Journal of hazardous materials*, *321*, 830-840.

Zarei, E., Yazdi, M., Abbassi, R., & Khan, F. (2019). A hybrid model for human factor analysis in process accidents: FBN-HFACS. *Journal of loss prevention in the process industries*, *57*, 142-155.

Zareia, E., Yazdib, M., Khakzadc, N., & Reniersc, G. (2019). Safety assessment of process systems using fuzzy extended bow tie (FEBT) model. *CHEMICAL ENGINEERING*, *77*.

Zenebe, A., & Norcio, A. F. (2009). Representation, similarity measures and aggregation methods using fuzzy sets for content-based recommender systems. *Fuzzy sets and systems*, *160*(1), 76-94.

Zeng, T., Chen, G., Reniers, G., & Hu, K. (2023). Resilience assessment of chemical industrial areas during Natech-related cascading multi-hazards. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 81, 104967.

Zhang, G., Yau, K. K., Zhang, X., & Li, Y. (2016). Traffic accidents involving fatigue driving and their extent of casualties. *Accident Analysis & Prevention*, *87*, 34-42.

Zhu, W., Guo, B., Li, Y., Yang, Y., Xie, C., Jin, J., & Gooi, H. B. (2023). Uncertainty quantification of proton-exchange-membrane fuel cells degradation prediction based on Bayesian-Gated Recurrent Unit. *eTransportation*, *16*, 100230.

Zhen, X., Han, Y., & Huang, Y. (2021). Optimization of preventive maintenance intervals integrating risk and cost for safety critical barriers on offshore petroleum installations. *Process Safety and Environmental Protection*, *152*, 230-239.

Zhou, T., Wu, C., Zhang, J., & Zhang, D. (2017). Incorporating CREAM and MCS into fault tree analysis of LNG carrier spill accidents. *Safety science*, *96*, 183-191.

Zwick, R., Carlstein, E., & Budescu, D. V. (1987). Measures of similarity among fuzzy concepts: A comparative analysis. *International journal of approximate reasoning*

Travaux de recherche publiés

(1) Daas S, Innal F. (2023, a). Unavailability Assessment based on Improved Dependent Uncertain Ordered Weighted Averaging Operator and Fault Tree Analysis. International Journal of Quality Reliability and Safety Engineering. https://doi.org/10.1142/S0218539323500183 https://www.worldscientific.com/doi/abs/10.1142/S0218539323500183

(2) Daas S, Innal F., (2023, b). Failure probability assessment of emergency safety barriers integrating an extension of event tree analysis and Fuzzy type-2 analytic hierarchy process. *Systems Engineering*. 26(5), 2023;1-19. https://doi.org/10.1002/sys.21668 https://incose.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/sys.21668

(3) Samia, Daas, and Fares Innal. (2023, c). "An extension of the failure mode effects and criticality analysis with fuzzy analytical hierarchy process method to assess the emergency safety barriers". *International Journal of Industrial Engineering: Theory, Applications and Practice*. 30 (2). https://doi.org/10.23055/ijietap.2023.30.2.8519 https://journals.sfu.ca/ijietap/index.php/ijie/article/view/8519

(4) Daas S, Innal F. (2023, d). Optimization the Reliability of Emergency Safety Barriers based on the Subjective Safety Analysis and Evidential Reasoning Theory. Case Study. *International Journal of Quality & Reliability Management*, vol. 41, no 1, p. 1-41. DOI: 10.1108/IJQRM-11-2022-0336 https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/IJQRM-11-2022-0336/full/html

(5) Daas S, Innal F. (2024, e). Reliability assessment of emergency safety barriers based on an intuitionistic fuzzy sets aggregation procedure and subjective safety analysis. A case study. International Journal of System Assurance, Engineering and Management (In progress).

International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering
2350018 (23 pages)
© World Scientific Publishing Company
DOI: 10.1142/S0218539323500183

Unavailability Assessment Based on Improved-Dependent Uncertain Ordered Weighted Averaging Operator and Fault Tree Analysis

Samia Daas
Laboratory of Research in Industrial Prevention (LRPI)
Institute of Health and Safety. University of Batna 2, Batna, Algeria
s.daas@univ-batna2.dz

Fares Innal
Institute of Applied Sciences and Techniques
Skikda University, Skikda, Algeria
fares.innal@univ-skikda.dz

Received 23 June 2022
Revised 7 September 2022
Accepted 3 October 2022
Published

The fire-fighting system is one of the proactive technical barriers related to liquefied petroleum gas storage tank safety. This paper presents an integrated approach that uses fuzzy set theory, an improved-dependent uncertain ordered weighted averaging operator and fault tree analysis to handle uncertainty in the unavailability assessment of fire-fighting systems. In this study, the center of area is used to defuzzify triangular fuzzy numbers. Furthermore, for the fire-fighting system fault tree, importance analysis, including Fussell–Vesely importance measure and risk reduction worth of basic events, are performed to identify the weak links of the fire-fighting system. In addition, a real case study on a fire-fighting system for a liquefied petroleum gas storage system in an LPG unit in Algeria is provided to illustrate the effectiveness of the proposed methodology. The research results show that the proposed methodology makes it possible to assess the unavailability of the entire system by analyzing weak links. Consequently, some suggestions are given to take preventive–corrective actions in advance, in order to reduce the failure probability of fire-fighting system and assist the practitioners in setting priorities for improving safety procedures in liquefied petroleum gas storage tanks. The study provides references for analyzing safety barriers in a complex system.

Keywords: Unavailability assessment; fuzzy set theory; dependent uncertain ordered weighted averaging operator; fault tree analysis; fire-fighting systems.

Received: 22 September 2022 | Revised: 2 February 2023 | Accepted: 6 February 2023

DOI: 10.1002/sys.21668

REVIEW ARTICLE

WILEY

Failure probability assessment of emergency safety barriers integrating an extension of event tree analysis and Fuzzy type-2 analytic hierarchy process

Samia Daas[1] | **Fares Innal**[2]

[1]Laboratory of Research in Industrial Prevention (LRPI), Institute of Health and Safety, University of Batna 2, Batna, Algeria

[2]Institute of Applied Sciences and Techniques, University of Skikda, Skikda, Algeria

Correspondence
Samia Daas, Laboratory of Research in Industrial Prevention (LRPI), Institute of Health and Safety, University of Batna 2, Constantine road No. 53. Fesdis, 05078, Batna, Algeria
Email: daas_samia@yahoo.com

Abstract

Liquefied petroleum gas (LPG) storage fires and explosions occur due to uncontrolled gas leaks and the gradual breakdown of associated safety barriers. By installing an effective safety barrier, these accidents can be greatly reduced. However, this study assesses the probability of failure of emergency safety barriers (ESBs) to help decision makers understand how they can support decisions to reduce the risks associated with LPG storage. In this context, an extension of the event tree analysis is proposed named emergency event tree analysis (EETA). The aim of this paper is to develop an integrated approach that uses interval type-2 fuzzy sets and Analytic Hierarchy Process (AHP) method and emergency event tree analysis to handle uncertainty in the failure probability assessment of emergency safety barriers (ESBs). In addition, a case study on the failure probability assessment of the emergency safety barriers of the LPG plant in Algeria based on the proposed methodology is provided and carried out to illustrate its effectiveness and feasibility. The results demonstrated the ability of interval type-2 fuzzy sets and the AHP method to provide highly reliable results and to evaluate the failure probability of emergency safety barriers in emergencies situations. However, the classical event tree analysis (CETA) does not take into account the possibility of assessing the emergency consequences of different accident scenarios. Consequently, it only allows you to estimate the occurrence probability of accident scenarios. The results of this study show that the value of the probability of failure of the emergency safety barriers can be used to estimate the probability of occurrence of emergency consequences under different accident scenarios, improved the reliability and help prioritize emergency improvement measures. The study provides scientific and operational references for analyzing emergency consequences of the various accident scenarios in all fields such as petrochemical, maritime industry, and health occupational.

KEYWORDS
analytical hierarchy process method, emergency event tree analysis, emergency safety barrier, failure probability assessment, fire accident, interval type-2 Fuzzy set

 © 2023 Wiley Periodicals LLC.

International Journal of Industrial Engineering, 30(2), 474-490, 2023

AN EXTENSION OF THE FAILURE MODE EFFECTS AND CRITICALITY ANALYSIS WITH FUZZY ANALYTICAL HIERARCHY PROCESS METHOD TO ASSESS THE EMERGENCY SAFETY BARRIERS

Daas Samia[1, *] and Innal Fares[2]

[1]Laboratory of Research in Industrial Prevention (LRPI)
Institute of Health and Safety, University of Batna 2
Batna, Algeria.
*Corresponding author's e-mail: s.daas@univ-batna2.dz

[2]Institute of Applied Sciences and Techniques
University of Skikda
Skikda, Algeria.

The emergency safety barrier is one of the reactive technical safety barriers in industrial facilities. Degrade of emergency safety barriers can lead to a major accident with serious consequences for people, property and the environment. In this context, the purpose of this article is to present a proposed methodology to identify these deficiencies, thus ensuring the effectiveness of the emergency safety barriers. This paper presents an integrated approach that uses fuzzy set theory, extension of failure modes, effects and criticality analysis and the fuzzy analytic hierarchy process method to deal with uncertainty in decision-making related to the prioritization of risk factors. These risk factors are the prioritization of corrective actions associated with the most critical disturbance modes to improve the reliability of emergency safety barriers. In addition, a Liquefied Petroleum Gas production facility was selected as a case study to assess the emergency safety barriers. The results show that the proposed methodology provides the possibility to evaluate the fire-fighting systems. In addition, the fuzzy analytical approach method is the most reliable and accurate. Therefore, some corrective actions are suggested to reduce the failure criticality of the emergency safety barriers and help practitioners prioritize the improvement of the emergency safety barriers of the Liquefied Petroleum Gas storage facility. This paper has an important role in the dysfunctional analysis of the emergency safety barriers related to the others effects of the release of LPG, such as the effects of domino scenarios.

Keywords: Emergency Safety Barriers; Disturbance Modes, Effects and Criticality Analysis; Fuzzy Set Theory; Analytic Hierarchy Process; Corrective Actions.

(Received on August 17, 2022; Accepted on February 24, 2023)

1. INTRODUCTION

LPG Storage tank accidents are rare but can result in serious consequences, including death, injury (Gomez *et al*., 2008; Al-Shanini *et al*., 2014), supply chain disruption, significant financial loss and environmental impact. A large tank fire is very complex and requires large amounts of fluids, such as foam and water, as well as equipment and emergency response teams to fight the fire. Looking at past events, we understand that the cost of this accident is very high. Moreover, reducing the number of major accidents based on Hazard and Operability (HAZOP analysis for unsafe installation is necessary. However, traditional HAZOP analysis has limitations in quantifying deviations (Wang *et al*., 2022). This study introduces Artificial Neural Networks (ANN) and Aspen HYSYS to explore the possibility of quantifying HAZOP deviations. The results show that the predicted severity of deviations can be close to the actual severity of deviations, and the prediction accuracy can reach almost high. Thus, the method reduces the possibility of ignition, rupture and liquid leakage. To this end, each major industrial accident is a reminder of the importance of preparedness to respond effectively in the event of an emergency by installing an effective emergency safety barrier (Hamzi *et al*., 2013; Innal *et al*., 2014; Girard *et al*., 2016). QRA is a systematic tool for assessing the hazards and methods to prevent and mitigate potential accidents. Quantitative chemical process risk analysis provides a quantitative or qualitative method for assessing industrial risks and identifying safety barriers for cost-effective risk reduction.

For this reason, the implementation of safety assessment and risk management of storage tanks is an important barrier measure to reduce risk occurrence and severity based on impact analysis. It also assesses their safety status and increases the

DOI: 10.23055/ijietap.2023.30.2.8519 ISSN 1943-670X © INTERNATIONAL JOURNAL OF INDUSTRIAL ENGINEERING

The current issue and full text archive of this journal is available on Emerald Insight at:
https://www.emerald.com/insight/0265-671X.htm

RELIABILITY PAPER

Optimization the reliability of emergency safety barriers based on the subjective safety analysis and evidential reasoning theory. Case study

Received 25 November 2022
Revised 13 March 2023
Accepted 27 March 2023

Daas Samia
Laboratory of Research in Industrial Prevention (LRPI), Institute of Health and Safety, University of Batna 2, Batna, Algeria, and
Innal Fares
Institute of Applied Sciences and Techniques, University of Skikda, Skikda, Algeria

Abstract

Purpose – This study aims to improve the reliability of emergency safety barriers by using the subjective safety analysis based on evidential reasoning theory in order to develop on a framework for optimizing the reliability of emergency safety barriers.

Design/methodology/approach – The emergency event tree analysis is combined with an interval type-2 fuzzy set and analytic hierarchy process (AHP) method. In order to the quantitative data is not available, this study based on interval type2 fuzzy set theory, trapezoidal fuzzy numbers describe the expert's imprecise uncertainty about the fuzzy failure probability of emergency safety barriers related to the liquefied petroleum gas storage prevent. Fuzzy fault tree analysis and fuzzy ordered weighted average aggregation are used to address uncertainties in emergency safety barrier reliability assessment. In addition, a critical analysis and some corrective actions are suggested to identify weak points in emergency safety barriers. Therefore, a framework decisions are proposed to optimize and improve safety barrier reliability. Decision-making in this framework uses evidential reasoning theory to identify corrective actions that can optimize reliability based on subjective safety analysis.

Findings – A real case study of a liquefied petroleum gas storage in Algeria is presented to demonstrate the effectiveness of the proposed methodology. The results show that the proposed methodology provides the possibility to evaluate the values of the fuzzy failure probability of emergency safety barriers. In addition, the fuzzy failure probabilities using the fuzzy type-2 AHP method are the most reliable and accurate. As a result, the improved fault tree analysis can estimate uncertain expert opinion weights, identify and evaluate failure probability values for critical basic event. Therefore, suggestions for corrective measures to reduce the failure probability of the fire-fighting system are provided. The obtained results show that of the ten proposed corrective actions, the corrective action "use of periodic maintenance tests" prioritizes reliability, optimization and improvement of safety procedures.

Research limitations/implications – This study helps to determine the safest and most reliable corrective measures to improve the reliability of safety barriers. In addition, it also helps to protect people inside and outside the company from all kinds of major industrial accidents. Among the limitations of this study is that the cost of corrective actions is not taken into account.

Originality/value – Our contribution is to propose an integrated approach that uses interval type-2 fuzzy sets and AHP method and emergency event tree analysis to handle uncertainty in the failure probability assessment of emergency safety barriers. In addition, the integration of fault tree analysis and fuzzy ordered averaging

The authors gratefully acknowledge the support provided by the SONATRACH petrochemical company and the liquefied petroleum gas unit in Algeria.

Declaration of competing interest: The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

International Journal of Quality & Reliability Management
© Emerald Publishing Limited
0265-671X
DOI 10.1108/IJQRM-11-2022-0326

Conférences Internationales

Echahid Hamma Lakhdar University, EL Oued, Algeria
Faculty of Exact Sciences, Computer Science Department

AIAP'18
First International Conference
on Artificial Intelligence and Its Application
EL OUED, ALGERIA, 04-05 DECEMBER 2018

CERTIFICATE OF PARTICIPATION

This is to certify that

Samia Daas

has presented a paper entitled:

"Contribution of the Artificial Intelligence for Failure Risk Assessment of a Surveillance System for the Emergency Response"

at the first International Conference on Artificial Intelligence and its Applications, AIAP'18

held in El Oued, Algeria, December 04-05, 2018

Faculty Dean

Conference Chair

Annexe (A). Directive européenne SEVESO iii

La directive européenne Seveso iii (2012/18/UE), relative à la maitrise des dangers liés aux accidents industriels utilisant des substances chimiques dangereuses, entre en application le 1er Juin 2015 et prend le relais Seveso II. La principale modification apportée par cette troisième version de la directive concerne son domaine d'application qui résulte de la prise en compte de la classification des substances et mélanges dangereux prévue par le règlement CLP (Classification, Labelling, Packaging), c'est à dire classification et étiquetage des produits chimiques.

Annexe (B). Fuzzy set theory type 2 in Matlab Software: AHP method

Numerical example

```
% code to generate AHP method using fuzzy set theory type 2 in Matlab

% Step 1: define the decision matrix
decisionMatrix = [1, 3, 5; 1/3, 1, 3; 1/5, 1/3, 1];

% Step 2: Normalize the decision matrix
normalizedMatrix = decisionMatrix ./ sum(decisionMatrix);

% Step 3: Calculate the weighted matrix
weights mean(normalizedMatrix);

% Step 4: Calculate the consistency ratio
n = size(decisionMatrix);
randomIndex = [0, 0, 0.58, 0.9, 1.12, 1.24, 1.32, 1.41, 1.45, 1.49];
consistencyIndex = max(eig(decisionMatrix)) – n;
consistencyRatio = consistencyIndex / randomIndex(n);

% Step 5: Display the results
disp("Normalizsd Decision Matrix:");
disp(normalizedMatrix);
disp("Weights:");
disp("Consistency Ratio:");
disp(consistencyRatio);
```

Annexe (C). Aggregation of Intuitionistic Fuzzy set using the Matlab Software

```
function [aggregated_set] = aggregate_sets(sets, operator)
    % Aggregates a set of intuitionistic fuzzy sets using the specified operator

    % Initialize the aggregated set
    aggregated_set = sets{1};

    % Iterate over the remaining sets
    for i = 2:length(sets)
        % Apply the specified operator to aggregate the sets
        switch operator
            case 'union'
                aggregated_set = max(aggregated_set, sets{i});
            case 'intersection'
                aggregated_set = min(aggregated_set, sets{i});
            case 'algebraic_sum'
                aggregated_set = aggregated_set + sets{i} - aggregated_set * sets{i};
            case 'bounded_sum'
                aggregated_set = min(aggregated_set + sets{i}, 1);
            case 'drastic_sum'
                if aggregated_set == 0
                    aggregated_set = sets{i};
                else
                    aggregated_set = 1;
                end
            otherwise
                error('Invalid operator specified');
        end
    end
end
```

Annexe (D). Analyse bibliométrique sur l'application de l'arbre de défaillance

Nous avons sélectionné l'une des bases de données les plus fiables, crédibles et répandues dans la recherche scientifique. Nous avons fait référence à la collection de la base des données "Scopus".

Afin d'obtenir le plus de littérature possible, nous avons sélectionné un certain nombre de mots-clés pertinents et cohérents directement liés à notre étude. Les combinaisons de recherche font référence à l'application de la méthode d'analyse d'arbre de défaillance et leurs améliorations avec les mots-clés suivants : "analyse d'arbre de défaillance" ou "évaluation des risques". La langue utilisée pour la recherche est l'anglais. La période cible est comprise entre 1973 et 2022. Au total, et après vérification des titres, résumés et mots-clés, fiches d'information relatives à 2520 des articles scientifiques ont été obtenus.

La figure D.1, montre le nombre des publications relatives à l'arbre de défaillance de la période comprise entre 1973 et 2022. Une analyse de 2520 articles de recherche a révélé que le nombre de publications sur l'utilisation de l'arbre de défaillance est augmenté ces dernières années. Les résultats obtenus montrent que la tendance des publications des travaux de recherche sur l'analyse d'arbre de défaillance liées à l'analyse des risques dans les revues internationales et les articles les plus importants dans le temps jusqu'à 2022 avec 183 articles.

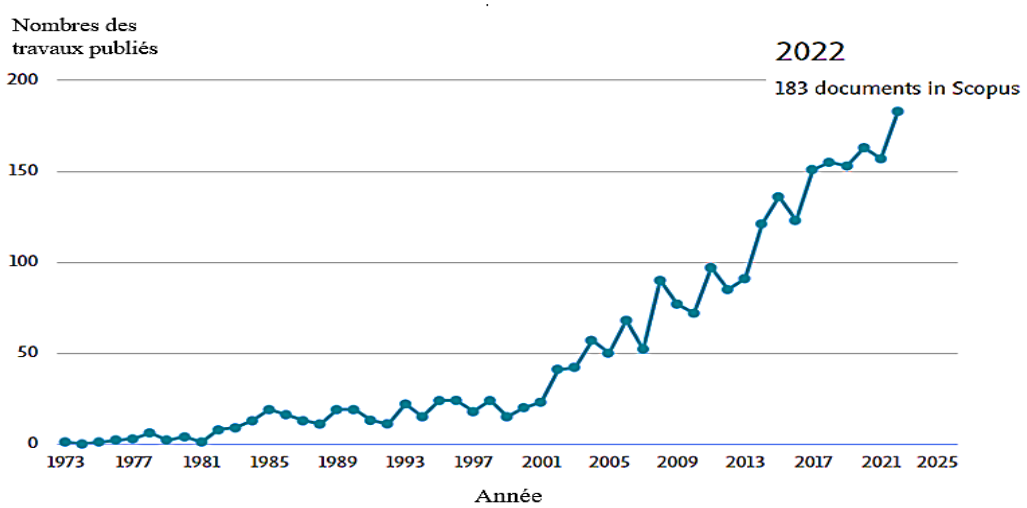
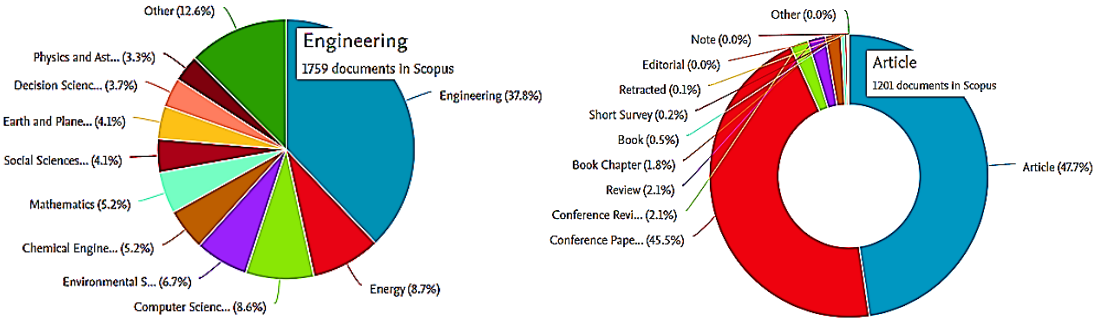


FIGURE D.1 – Nombre des publications relatives à l'arbre de défaillance entre la période de 1973- 2022 (Source. Base des données Scopus).

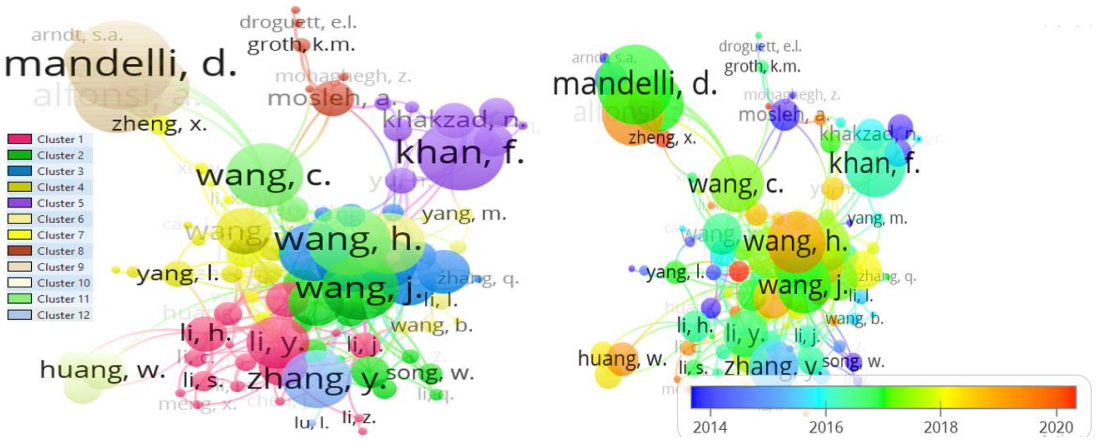
La figure D.2, montre le nombre des travaux publiés sur l'arbre des défaillances par domaine et par type. Les résultats obtenus, montrent que l'utilisation de l'arbre de défaillance dans le domaine de l'ingénierie est 1759, soit de 37.8% et les autres travaux la comme la médecine et la science des matériaux, etc, avec 12,6%, puis le domaine de l'énergie avec 8,7%. En conséquence, le nombre des travaux publiés par type tels que les articles est de 47,7%, les articles de conférence de 45,5%, etc. Il y a une très grande importance accordée à cette approche pour le traitement des données issues des approches de la sûreté de fonctionnement.



(a). Travaux publiés par domaine. (b). Travaux publiés par type.

FIGURE D.2 – Travaux de recherche publiés relative à l'arbre de défaillance entre la période 1973-2022 (Source. Base des données Scopus).

Le logiciel "VOS Viewer", permet d'analyser qualitativement la revue de la littérature relative à l'application de l'analyse d'arbre de défaillance (Amin *et al.*, 2019 ; Li *et al.*, 2017 ; Xue *et al.*, 2021). La figure D.3 (a)-(b) et (c), représente la visualisation du réseau, la superposition de visualisation et la visualisation de densité de la force totales des liens en fonction des travaux moyennes publiés/ an dans la période de 1973- 2022. Les résultats obtenus montrent que "Mandelli D.", il appartient au cluster 9, la force totale des liens est 31 et la moyennes de publication en 2016 est 93. Par contre "Khan F.", il appartient au cluster 5, la force totale des liens est 25 et la moyennes de publication en 2016 est 33.



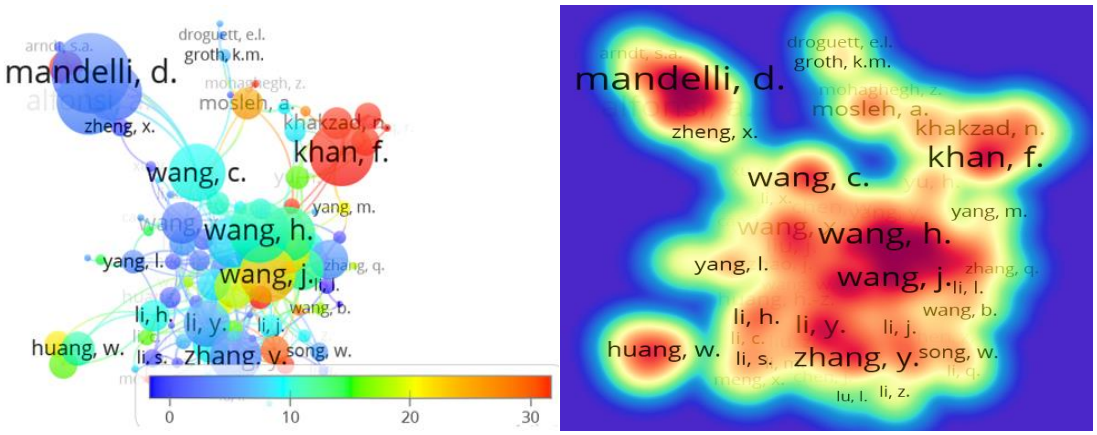
(a). Visualisation du réseau. (b). Superposition de visualisation.

(c). Visualisation de la densité.

FIGURE D.3– Force total des liens en fonction des travaux moyenne publiés /an dans la période de 1973- 2022.

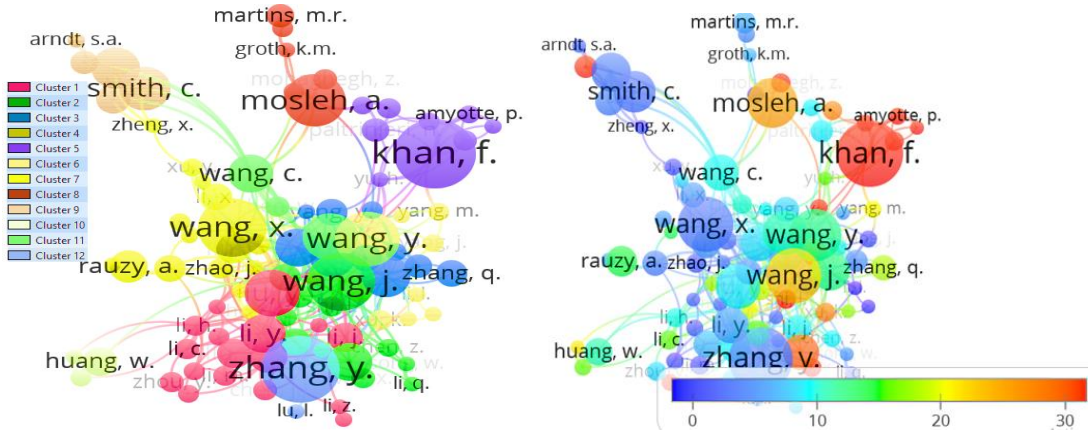
La figure D.4 (a) et (b), représente la visualisation du réseau, la superposition de visualisation et la visualisation de densité des documents publiés en fonction de citation moyenne/ an dans la période de 1973- 2022. Les résultats obtenus montrent que "Mandelli D.", il appartient au cluster 9, la force totale des liens est 31 et la moyennes de citation est 4.50. Par contre "Khan F.", il appartient au cluster 5, la force totale des liens est 25 et la moyennes de citation des travaux est 55.62.

La figure D.5 (a)-(b) et (c), représente la superposition de visualisation et la visualisation de densité de la force totales des liens en fonction de citation moyenne des travaux publiés /an dans la période de 1973- 2022. Les résultats obtenus montrent que "Khan F.", il appartient au cluster 5, la force totale des liens est 25, le nombre des documents est 24 et la moyennes de citation des travaux est 55.62. Par contre "Wang J.", il appartient au cluster 2, la force totale des liens est 22, le nombre des documents est 20 et la moyennes de citation des travaux est 22.90.

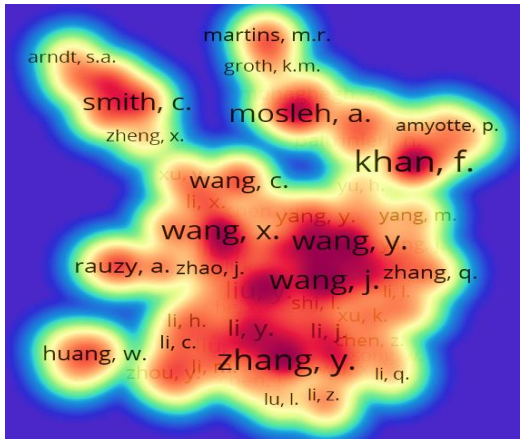


(a). Superposition de visualisation. (b). Visualisation de la densité.

FIGURE D.4 – Force total des liens en fonction de citation moyenne des travaux publiés /an dans la période de 1973- 2022.



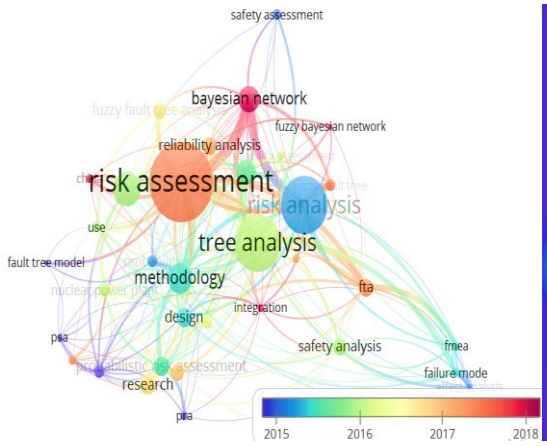
(a). Superposition de visualisation. (b). Visualisation de la densité.



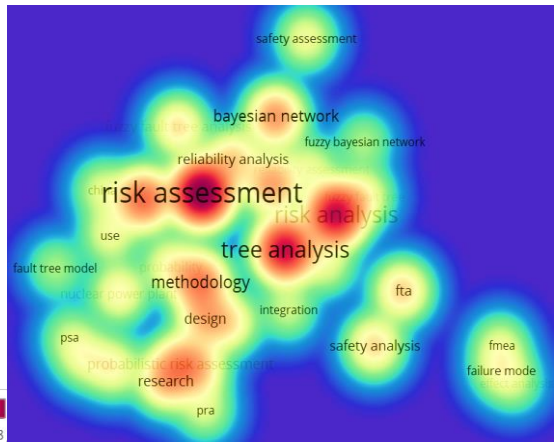
(c). Visualisation de la densité.

FIGURE D.5 – Documents publiés en fonction de citation moyenne /an dans la période de 1973- 2022.

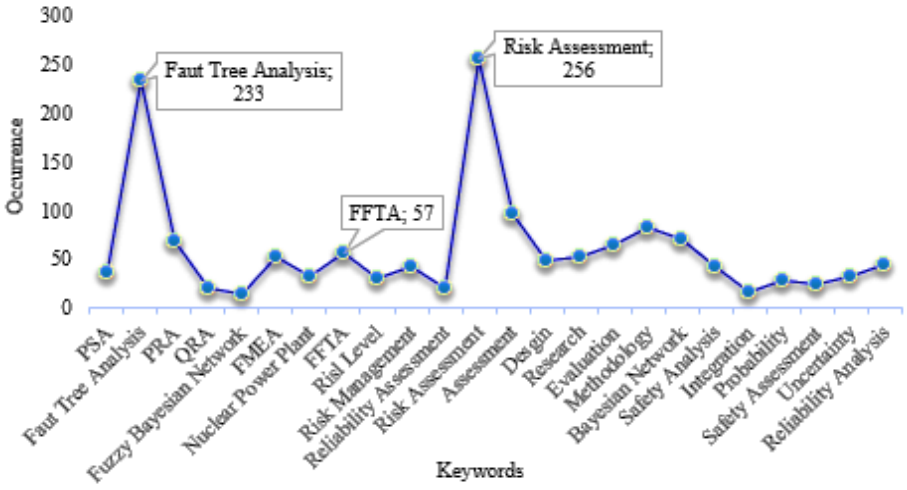
La figure D.6 (a)-(b) et (c), représente la superposition de visualisation, la visualisation de densité et de l'occurrence des mots clés publiés en fonction des travaux moyenne publiés /an dans la période de 1977- 2022. Les résultats obtenus montrent que le mot clé "évaluation des risques", il appartient au cluster 3, la force totale des liens est 115, l'occurrence de publication est de 256 et la moyennes de publication en 2017 est 33. Le mot clé "analyse d'arbre de défaillance", il appartient au cluster 5, la force totale des liens est 125, l'occurrence de publication est de 175 et la moyennes de publication en 2016 est 8. Par contre, le mot clé "réseau bayesian", il appartient au cluster 5, la force totale des liens est 73, l'occurrence de publication est de 71 et la moyennes de publication en 2018 est 96 articles.



(a). Superposition de visualisation.



(b). Visualisation de la densité.



(c). Occurrence des mots clés publiés dans la période de 1977- 2022.

FIGURE D.6 – Occurrence des mots clés publié en fonction des travaux moyenne publiés /an dans la période de 1973- 2022.

الحمد لله