



Université d'Oran 2

Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle

Laboratoire Ingénierie de la Sécurité Industrielle et Développement Durable

THÈSE

Pour l'obtention du diplôme de Doctorat « L.M.D »
En Ingénierie de la Sécurité des Procédés et d'Environnement

Analyse des risques sur un bac de stockage des hydrocarbures en présence des données incertaines

Par Mme. Zahra DJEMAI Épouse GUELMANE

Dirigée par Pr. Nassima AISSANI
Professeur à l'Université Mohamed Ben Ahmed Oran2

Présentée et soutenue publiquement le 03/07/2025

Devant un jury composé de :

- Pr. Zoubida LOUNIS, *Université Mohamed Ben Ahmed Oran2, Président*
Pr. Habib ACHACHE, *Université Mohamed Ben Ahmed Oran2, Examineur*
Dr. Mohamed CHENNOUFI, *Université Mohamed Ben Ahmed Oran2, Examineur*
Pr. Khadidja YACHBA, *Ecole Supérieure d'Economie d'Oran, Examineur*
Dr. Asmaa BENGUEDDACH, *Université Ahmed Ben Bella Oran1, Examineur*

ملخص:

تُحدث صناعة النفط تأثيراً كبيراً على البيئة، مما يجعل من الضروري إجراء تحليل دقيق للمخاطر. تركز هذه الدراسة على تحليل المخاطر المرتبطة بخزانات تخزين المنتجات النفطية. ومع ذلك، غالباً ما تعيق الدراسات المتعمقة ندرة البيانات التاريخية أو عدم اكتمالها. تهدف هذه الدراسة، في مرحلتها الأولى، إلى وضع إطار جديد يجمع بين أسلوب "Bow-tie" ومنهجية "MIMAH" (المنهجية المعتمدة لتحديد مخاطر الحوادث الكبرى)، وذلك لتحديد سيناريوهات الحوادث الحرجة وأسبابها المتعددة في خزانات تخزين المنتجات النفطية. تُعد مسألة الحصول على بيانات تاريخية دقيقة تحدياً حقيقياً بسبب ندرتها وعدم كفايتها ونموضها. ولمعالجة هذه الصعوبات وتوقع تطور موثوقة النظام، تقترح الدراسة دمج طرق إدارة عدم اليقين مع تقنيات اتخاذ القرار متعددة المعايير، لا سيما من خلال استخدام عملية تحليل هرمي ضبابية معدلة اعتماداً على طريقة تحليل الامتداد لتشاغ "FAHP-EAM"، إلى جانب تقنيات التجميع والتضبيب وإزالة التضبيب ضمن إطار نظرية المجموعات الضبابية، وذلك بالاعتماد على استخلاص خبرات الخبراء. علاوة على ذلك، يتم تحويل نموذج "Bow-tie" إلى شبكة بايزية ديناميكية بهدف تعزيز تحليل المخاطر من خلال دمج المنطق الاحتمالي وتفسير التفاعلات بين مختلف عوامل الخطر. وقد تم التحقق من صحة هذا النهج المتكامل بالاعتماد على سيناريوهات واقعية، مما يسمح بتقييم مساهمة الأحداث الأساسية في وقوع الحوادث الحرجة وكذلك تقييم أثرها البيئي. كما تمكّن هذه الدراسة من التنبؤ بمناطق التهديد الناتجة عن التأثيرات الخطرة مثل السمية، الإشعاع الحراري، والضغط الزائد المرتبط بانبعاث المواد الكيميائية عقب الحوادث الحرجة. وتُوفّر النتائج بيانات جوهرية لتحليل وتقييم المخاطر، مما يساعد المدراء على تحسين استراتيجياتهم في إدارة المخاطر ضمن البنى الصناعية.

الكلمات المفتاحية : خزان تخزين المنتجات البترولية، منهجية MIMAH، طريقة Bow-tie، عدم اليقين، اتخاذ القرار متعدد المعايير، الشبكة Bayesian، حكم الخبراء، نظرية المجموعات الضبابية، الأثر البيئي، نمذجة التأثيرات.

Résumé : L'industrie pétrolière a un impact significatif sur l'environnement, ce qui rend nécessaire une analyse rigoureuse des risques. Cette étude se concentre sur l'analyse des risques associés aux réservoirs de stockage de produits pétroliers. Toutefois, les études approfondies sont souvent entravées par des données historiques incomplètes. Dans un premier temps, cette recherche vise à établir un nouveau cadre combinant la méthode Bow-tie et la méthodologie MIMAH (Méthodologie pour l'identification des risques d'accidents majeurs) afin d'identifier les scénarios d'accidents critiques ainsi que leurs multiples causes associées dans les réservoirs de stockage de produits pétroliers. L'acquisition de données historiques précises constitue un défi en raison de leur rareté, de leur insuffisance et de leur imprécision. Pour surmonter ces obstacles et prévoir l'évolution de la fiabilité du système, l'étude propose de combiner des méthodes de gestion de l'incertitude et des techniques de prise de décision multicritères, en particulier un processus de hiérarchie analytique floue modifié à l'aide de la méthode d'analyse de l'étendue de Chang (FAHP-EAM), ainsi que des techniques d'agrégation, de fuzzification et de defuzzification relevant de la théorie des ensembles flous, associées à l'élicitation d'experts. En outre, le modèle Bow-tie est transformé en un réseau bayésien dynamique afin d'améliorer l'analyse des risques en intégrant un raisonnement probabiliste et en capturant les interactions entre les différents facteurs de risque. Cette approche intégrée est validée à partir de scénarios réels, permettant d'évaluer la contribution des événements de base aux événements critiques ainsi que leur impact environnemental. L'étude permet également de prédire les zones de menace pour des effets dangereux tels que la toxicité, le rayonnement thermique et la surpression liés aux rejets de produits chimiques consécutifs à l'événement critique. Les résultats fournissent des données essentielles pour l'analyse et l'évaluation des risques, aidant ainsi les gestionnaires à affiner leur gestion des risques en milieu industriel.

Mots-clés : Réservoir de stockage de produits pétroliers, approche MIMAH, méthode Bow-tie, incertitude, prise de décision multicritères, réseau bayésien, jugement d'experts, théorie des ensembles flous, impact environnemental, modélisation des effets.

Abstract: The petroleum industry significantly impacts the environment, making a rigorous risk analysis essential. This study focuses on the risk assessment associated with petroleum storage tanks. However, comprehensive studies are often hindered by incomplete historical data. Initially, this study aims to create a novel framework that combines the Bow-tie method with MIMAH methodology (Methodology for the Identification of Major Accident Hazards) to identify critical accident scenarios and their multiple associated causes for petroleum storage tanks. Challenges arise in acquiring accurate historical data due to its lack, insufficiency, and imprecision. To overcome these issues and forecast reliability system evolution, the study proposes a combination of uncertainty management methods and multi-criteria decision-making techniques, specifically a modified Fuzzy Analytical Hierarchy Process with Chang's Extent Analysis Method (FAHP-EAM), along with aggregation, fuzzification, and defuzzification techniques from fuzzy set theory, combined with expert elicitation. Moreover, the Bow-tie model is transformed into a dynamic Bayesian network to enhance risk analysis by incorporating probabilistic reasoning and capturing interactions among various risk factors. This integrated approach is validated against real-world scenarios, allowing for the assessment of basic events' contributions to critical events and their environmental impacts. The study also predicts threat zones for hazardous effects such as toxicity, thermal radiation, and overpressure linked to chemical releases post-critical events. The findings provide essential data for risk analysis and assessment, aiding managers in refining risk management practices and developing effective mitigation strategies in industrial environments.

Keywords: Petroleum storage tank, MIMAH approach, Bow-Tie method, uncertainty, multicriteria decision-making, Bayesian network, expert judgment, fuzzy set theory, environmental impact, effects modeling.

Dédicace

À mon père,

Porteur de mes premiers rêves, merci pour tes encouragements constants, ta foi en moi, et pour m'avoir incitée à franchir les premières étapes de ce long chemin. Ce doctorat est aussi le fruit de ton soutien silencieux mais profond.

À mon époux,

Pour son soutien profond, sa patience et sa présence essentielle tout au long de ce chemin. Ce travail t'est dédié avec reconnaissance.

À ma fille Aline,

Petit trésor offert par Allah, ta présence a illuminé mes journées, même les plus éprouvantes. Du haut de tes trois ans et demi, tu as été une source de motivation, de tendresse et d'équilibre. Ce travail, tu l'as partagé avec moi, sans le savoir.

À mon frère et à ma sœur,

Merci pour votre disponibilité et votre soutien, pour avoir été présents chaque fois que la distance m'empêchait de l'être.

À toute ma famille,

Pour votre amour, vos encouragements, vos prières et votre présence bienveillante dans les moments de doute comme de réussite.

À ma directrice de thèse,

Pour sa patience, son écoute et son accompagnement éclairé tout au long de ce travail. Merci pour votre confiance et vos conseils qui ont contribué à faire aboutir cette recherche.

Remerciements

Au terme de ce travail de thèse, je tiens avant tout à exprimer ma gratitude envers Allah, Le Tout-Puissant, pour m'avoir guidée, soutenue et accordé la force, la patience et la persévérance indispensables à l'aboutissement de cette recherche.

Cette thèse représente l'aboutissement de plusieurs années d'engagement, de réflexion, d'efforts soutenus, et de remises en question. Elle n'aurait pu voir le jour sans le soutien indéfectible et l'implication précieuse de nombreuses personnes à qui je souhaite rendre hommage ici.

*Je tiens à exprimer ma reconnaissance la plus profonde à ma directrice de thèse, **Professeur Nassima AISSANI**, pour son accompagnement bienveillant, sa rigueur scientifique, sa disponibilité constante, ainsi que la confiance qu'elle m'a témoignée tout au long de ce parcours. Son encadrement attentif et ses conseils avisés ont été une source d'inspiration et de motivation continue. Je mesure pleinement la chance que j'ai eue de bénéficier de son expérience, et je lui adresse mes remerciements les plus sincères.*

*J'adresse également mes remerciements à **Professeur Abdelghani BEKRAR**, Associate Professor à l'Université Polytechnique Hauts-de-France de Valenciennes, pour l'intérêt qu'il a porté à mon travail, la richesse de ses échanges, ainsi que son soutien académique, qui ont considérablement nourri ma réflexion.*

*Je souhaite également remercier **Professeur Zoubida LOUNIS**, Professeur à l'Université Oran 2, pour son appui et ses conseils au fil de cette recherche.*

*Je tiens à exprimer toute ma gratitude aux membres du jury qui m'ont fait l'honneur d'évaluer ce travail de thèse. Je remercie vivement **Professeur Zoubida Lounis**, de l'Université Mohamed Ben Ahmed Oran 2, pour avoir accepté de présider ce jury, ainsi que **Professeur Habib ACHACHE** (Université Oran 2), **Docteur Mohamed CHENNOUFI** (Université Oran 2), **Professeur Khadidja YACHBA** (École Supérieure d'Économie d'Oran) et **Docteur Asmaa BENGUEDDACH** (Université Oran 1), pour avoir accepté d'examiner ce travail.*

Sommaire

Sommaire	6
Liste des figures	10
Liste des tableaux	12
Introduction générale	13
1 Les risques et leurs impacts environnementaux dans l'industrie pétrolière	17
1 Introduction	17
2 Généralité sur la notion de risque	17
2.1 Évolution du concept "Risque"	18
2.2 Définitions du terme "Risque"	18
2.3 Métrique de risque	19
2.4 Terminologie associée au terme "Risque"	20
2.5 Distinction entre risque, danger et incertitude	24
3 Typologie des risques	25
3.1 Classification générale des risques dans l'industrie pétrolière et gazière . .	25
3.2 Classification des risques associés aux systèmes Cyber-Physiques dans l'in- dustrie pétrolière et gazière	27
4 Risques liés aux stockages d'hydrocarbures	28
4.1 Hydrocarbures pétroliers	28
4.1.1 Pétrole brut	28
4.1.2 Gasoil	29
4.1.3 Essence	29
4.1.4 Kérosène	29
4.1.5 Huiles lourdes	30
4.2 Réservoirs de stockage des hydrocarbures	30
4.2.1 Éléments techniques communs aux bacs de stockage atmosphériques	30
4.2.2 Types de bacs de stockage atmosphériques	32
4.3 Risques associés aux bac de stockage atmosphérique des hydrocarbures .	34
4.3.1 Risques liés au stockage des hydrocarbures	35
4.3.2 Phénomène dangereux	39
5 Impacts environnementaux	40
5.1 Pollution des sols et des eaux	41
5.2 Émissions atmosphériques	43
6 Études de cas sur des incidents passés	44
6.1 Analyse statistique des accidents dans le secteur des hydrocarbures	44

6.2	Accidents majeurs dans les installations de stockage : Retours d'expérience	46
7	Conclusion	51
2	Analyse des risques industriels	53
1	Introduction	53
2	Gestion des risques	53
2.1	Analyse des risques	54
2.2	Evaluation des risques	54
2.3	Maîtrise ou réduction des risques	54
3	Démarche de l'analyse des risques d'une installation industrielle	55
3.1	Définition du système et des objectifs à atteindre	55
3.2	Collecte des données essentielles à l'analyse des risques	55
3.3	Définition de la démarche à mettre en œuvre	56
4	Méthodes d'analyse des risques	56
4.1	Approches des méthodes d'analyse des risques	56
4.2	Types des méthodes d'analyse des risques	57
4.3	Démarches des méthodes d'analyse des risques	58
4.4	Méthodes statiques et dynamiques dans l'analyse des risques	58
5	Aperçu des méthodes d'identification et d'analyse des risques industriels	58
5.1	APR (Analyse préliminaire des risques)	58
5.2	HAZOP (Hazard and Operability Study)	59
5.3	AMDEC (Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité)	59
5.4	ADD (Arbres de défaillances)	60
5.5	ADE (Arbres des événements)	60
5.6	Bow-tie (Méthode nœud papillon)	61
5.7	MIMAH (Method for the Identification of Major Accident Hazards)	63
6	Concepts Généraux de la Fiabilité et de la probabilité	63
6.1	Fiabilité	63
6.2	Probabilité	65
6.3	Relations fondamentales en probabilité	66
6.4	Quelques relations de fiabilité	69
7	Analyse des arbres de défaillance	72
7.1	Analyse qualitative	73
7.1.1	Coupes minimales (MCS)	73
7.1.2	Chaînes minimales (MPS)	74
7.1.3	Défaillances de cause commune (CCF)	74
7.2	Analyse quantitative	74
7.2.1	Modélisation des probabilités de défaillance	75
7.2.2	Modélisation Bayésienne	75
7.2.3	Passage des arbres de défaillance aux réseaux bayésiens	78
7.2.4	Analyse de la disponibilité du système	79
7.2.5	Mesures d'importance	80
8	Conclusion	82
3	Incertitude et importance des données dans le domaine de la gestion des risques	83
1	Introduction	83
2	Incertitudes inhérentes à l'analyse par arbre de défaillance	84

2.1	Sources d'incertitudes et leurs impacts	84
2.2	Classification des incertitudes dans le processus d'analyse des risques . . .	85
3	Gestion avancée de l'incertitude dans l'analyse des risques des réservoirs par l'arbre de défaillance	86
4	Gestion de l'incertitude à travers les approches avancées	88
4.1	Jugement d'experts	88
4.2	Distribution de probabilité	89
4.3	Prise de décision multi-critère-MCDM	90
4.3.1	Processus hiérarchique analytique (AHP)	92
4.3.2	Processus hiérarchique analytique flou (FAHP)	93
4.4	Réseau bayésien	93
4.5	Théorie de la logique flou	95
5	Conclusion	99
4	Étude de cas et méthodologie développée	101
1	Introduction	101
2	Présentation du cas d'étude	101
3	Méthodologie développée	103
3.1	Description	103
3.2	Objectif	105
4	Analyse semi-quantitative des risques	106
4.1	Identification des dangers, analyse et classement des risques	106
4.1.1	Méthode HAZOP	106
4.1.2	Matrice de risque	108
4.2	Regroupements des risques basé sur la démarche MIMAH	109
5	Modèle Bow-tie issu de MIMAH : causes et conséquences	110
5.1	Développement de l'arbre de défaillance	111
5.2	Développement de l'arbre des événements	111
6	Analyse quantitative	112
6.1	Traitement des données des événements de base disponibles	112
6.2	Traitement des données des événements de base incertains	113
6.2.1	Jugement d'experts	113
6.2.2	Pondération des experts	115
6.2.3	Estimation des probabilités de défaillance incertaines	119
6.2.4	Développement d'un outil d'expérimentation	122
6.3	Collecte des données sur les probabilités d'ignition	123
7	Évaluation de l'impact environnemental dans le cadre de l'analyse dynamique des risques	124
7.1	Analyse dynamique des risques par le réseau bayésien	124
7.2	Mesures d'importance des événements de base	126
7.3	Modélisation des effets des phénomènes dangereux	126
8	Conclusion	128
5	Expérimentation et résultats	131
1	Introduction	131
2	HAZOP/Matrice d'évaluation des risques	131
3	Méthode Bow-tie basée sur MIMAH	133
3.1	Développement de l'arbre de défaillance (ADD)	133

3.2	Développement de l'arbre des évènements (ADE)	135
3.3	Développement du modèle noué de papillon (Bow-Tie)	135
4	Quantification du Bow-tie	139
4.1	Quantification de l'ADD	139
4.1.1	Elaboration du questionnaire	141
4.1.2	Jugement d'experts et pondération	141
4.1.3	Agrégation des avis des experts	144
4.1.4	Comparaison de la probabilité de rupture avec les valeurs de référence	147
4.1.5	Ensembles de coupes minimales	150
4.1.6	Mesures d'importance	150
4.2	Quantification de l'ADE	152
4.2.1	Analyse dynamique de l'impact des causes	152
4.2.2	Analyse des impacts environnementaux	153
4.2.3	Modélisation des effets	154
4.3	Conclusion	158
	Conclusion générale et perspectives	161
	Annexes	163
	Bibliographie	169

Liste des figures

1.1	Sources d'émissions des produits pétroliers	44
1.2	Principaux polluants atmosphériques émis par les industries du raffinage du pétrole et de la pétrochimie	44
1.3	Accident de Buncefield, Hertfordshire, Royaume-Uni	47
1.4	Accident de Pulau Merlimau, Singapour	48
1.5	Accident de Deer Park, Texas	49
1.6	Accident de Caribbean Petroleum Corporation (CAPECO), Bayamón, Porto Rico	50
2.1	Typologie des méthodes d'analyse des risques	57
2.2	Exemple d'arbre de défaillance	61
2.3	Exemple d'arbre d'évènement	62
2.4	Exemple Bow-Tie	62
2.5	Etape de la méthode MIMAH (Method for the Identification of Major Accident Hazards)	64
2.6	Quelques lois de la théorie des ensembles: (a): $A + B$, (b): $A \cdot B$, (c) Ensembles disjoints, (d) Différence d'ensembles: $A - B$, (e) Complémentaire d'un ensemble : A' , (f) Loi de distributivité, $A(B + C) = AB + AC$, (g) Loi de distributivité, $(A + B)(A + C) = A + BC$, (h) Loi de dualité (De Morgan), $(A + B)' = A'B'$, (i) Loi de dualité (De Morgan), $(AB)' = A' + B'$ [Lees, 2012]	67
2.7	Distribution exponentiel: (a) Taux de défaillance, (b) Densité de défaillance, (c) Fiabilité, (d) Non fiability ou Défaillance [Lees, 2012]	72
2.8	Exemple de conversion de l'ADD en BDD	74
2.9	Exemple d'arbre de défaillance montrant l'ajout de la cause commune C aux événements P et S	75
2.10	Un graphe orienté avec une boucle de rétroaction. Ceci n'est pas autorisé dans les réseaux bayésiens	77
2.11	Un graphe orienté acyclique (DAG). Les probabilités à spécifier sont: $P(A)$, $P(B)$, $P(C A,B)$, $P(E C)$, $P(D C)$, $P(F E)$, $P(G D,E,F)$	78
2.12	Cartographie de l'ADD vers le RB (Réseau Bayésien)	80
2.13	Exemple de portes "ET" et "OU" dans la conversion de l'ADD en réseau Bayésien [Bobbio et al., 2001]	81
3.1	Représentation schématique du processus AHP	93
3.2	Conversion du modèle nœud papillon en un réseau bayésien correspondant	95
3.3	Répartition des publications sur l'utilisation des réseaux bayésiens dans le contexte de la sécurité	96
3.4	Ensemble classique et ensemble flou pour les états sûr et non sûr	97

3.5	Nombre flou triangulaire représentant l'estimation de la possibilité pour un événement d'entrée (comme un événement de base)	97
3.6	Le cadre d'un système commun de modélisation floue	98
4.1	Réservoir de stockage de condensat - Etude de cas	102
4.2	Schéma de flux du processus	103
4.3	Méthodologie développée	107
4.4	Matrice de risque [Det Norske Veritas, 2010]	108
4.5	Niveau de risque [Det Norske Veritas, 2010]	109
4.6	Fonctions d'appartenance floues [Chen and Hwang, 1992]	114
4.7	Intersection entre deux nombres flous M_1 et M_2 [Chang, 1996]	118
4.8	Processus de conversion du modèle BT-MIMAH en réseau bayésien correspondant .	125
4.9	Cadre de données de simulation sous ALOHA	127
5.1	Classement des scénarios d'accidents des résultats de HAZOP selon les événements critiques de la méthodologie MIMAH	133
5.2	Classification des événements critiques du réservoir	134
5.3	Arbre de défaillance basée sur MIMAH	137
5.4	Réseau bayésien pour l'accident majeur "rupture catastrophique" du réservoir de stockage de condensat	138
5.5	Schématisation entre les deux graphes des poids des experts selon les deux techniques	145
5.6	Variation de l'indisponibilité du système en fonction de la probabilité de défaillance de l'EB19	152
5.7	Simulation des effets des phénomènes dangereux (1)	156
5.8	Simulation des effets des phénomènes dangereux (2)	157

Liste des tableaux

1.1	Quelques événements dangereux principaux et événements initiateurs pour les réservoirs de stockage	38
1.2	Sources de pollution par les hydrocarbures et leurs effets [Imron et al., 2020]	41
1.3	Exemples d'accidents où la cuvette de rétention a défailli	42
1.4	Conséquences des accidents des industries pétrolières	43
2.1	Quelques définitions, opérations et lois de la théorie des ensembles [Lees, 2012] . . .	66
3.1	Matrice des critères des experts et leurs poids calculés correspondants	91
3.2	Variables linguistiques pour la comparaison par paires [Saaty, 1980]	92
4.1	Paramètres du réservoir	102
4.2	Paramètres du procédé et types de déviations	106
4.3	Échelle de probabilité [Det Norske Veritas, 2010]	108
4.4	Échelle de gravité [Det Norske Veritas, 2010]	109
4.5	Tableau des équipements et des causes d'événements critiques [Delvosalle et al., 2004c]	110
4.6	Nombres flous correspondants aux termes linguistiques [Chen and Hwang, 1992] . .	115
4.7	Variables linguistiques pour la comparaison par paires [Saaty, 1980]	117
4.8	Probabilités d'inflammation [Delvosalle et al., 2004a]	124
5.1	Classement des niveaux de criticité de 28 risques identifiés par la démarche HAZOP	132
5.2	Structuration des risques en catégories d'événements critiques de MIMAH en fonction de leurs impact	132
5.3	Significations des événements de base dans l'arbre de défaillance de la rupture catastrophique et leurs probabilités de défaillance	140
5.4	Critères des experts et leurs poids calculés correspondants	143
5.5	Poids de l'expert E2	144
5.6	Résultat du jugement des experts	145
5.7	Degré de similarité entre chaque paire d'experts	147
5.8	Nombre flou trapézoïdal combiné de EB15	148
5.9	Résumé des résultats obtenus pour les événements de base avec un taux de défaillance inconnu sur la base des poids obtenu par FAHP-EAM	148
5.10	Résumé des résultats obtenus pour les événements de base avec un taux de défaillance inconnu sur la base des poids obtenu par M-FAHP-EAM	149
5.11	Événements de base contribuant à la rupture catastrophique d'un réservoir de stockage de condensat	150
5.12	Résultats des ensembles de coupure minimaux	151
5.13	Résultats d'importance	153

Introduction générale

L'industrie pétrolière joue un rôle fondamental dans l'économie mondiale, constituant un pilier essentiel pour l'approvisionnement en énergie et les matières premières industrielles. Cependant, ce secteur est également confronté à des risques considérables, notamment en ce qui concerne le stockage des hydrocarbures dans de grands réservoirs. Ces systèmes de stockage, omniprésents dans les raffineries de pétrole, les terminaux pétroliers et les installations de traitement chimique, sont intrinsèquement vulnérables en raison de la nature dangereuse de leur contenu. Les produits pétroliers sont hautement inflammables, explosifs et persistants sur le plan environnemental, constituant ainsi des menaces significatives pour la santé humaine, les écosystèmes et les infrastructures. Les accidents impliquant des réservoirs de stockage d'hydrocarbures, tels que des incendies, des explosions et des fuites, ont historiquement entraîné des conséquences catastrophiques. Par exemple, des incidents tels que l'explosion de Buncefield en 2005 et la marée noire de Deepwater Horizon en 2010 illustrent les graves répercussions environnementales, économiques et sociales de ces événements.

Compte tenu de ces risques, la gestion sécuritaire des réservoirs de stockage de pétrole constitue un aspect essentiel de l'ingénierie de la sécurité des procédés. Une analyse efficace des risques est cruciale pour prévenir les accidents, en atténuer les conséquences et améliorer la fiabilité de ces systèmes. Cependant, réaliser des évaluations robustes des risques dans ce contexte s'avère complexe en raison des incertitudes inhérentes aux données, notamment l'incomplétude des archives historiques, les statistiques d'échec imprécises et la variabilité des conditions environnementales et opérationnelles. Relever ces défis nécessite des méthodologies innovantes qui intègrent des techniques avancées de modélisation des risques capables de prendre en compte l'incertitude et les interactions dynamiques entre les facteurs de risque.

L'analyse des risques associés aux réservoirs de stockage de pétrole implique l'identification des scénarios d'accidents, l'estimation de leur probabilité et l'évaluation de leurs conséquences potentielles. Les approches traditionnelles d'analyse des risques, telles que l'analyse par arbre de défaillance (ADD) et l'analyse par arbre d'événements (ADE), fournissent des cadres structurés pour comprendre les relations causales et les résultats potentiels des événements critiques. Cependant, ces méthodes sont souvent limitées par leur dépendance à des données quantitatives précises, qui peuvent être indisponibles ou peu fiables dans des contextes réels.

L'industrie pétrolière se caractérise par des systèmes complexes où les interactions entre les composants, les facteurs humains et les conditions externes introduisent une incertitude significative. Par exemple, les probabilités de défaillance des équipements, d'erreur humaine ou d'impacts externes peuvent varier considérablement selon le contexte et sont souvent difficiles à quantifier avec précision. Les méthodes déterministes conventionnelles ne parviennent pas à capturer cette incertitude, ce qui peut conduire à des évaluations potentiellement simplifiées qui sous-estiment ou surestiment les risques.

De plus, l'impact environnemental des accidents liés aux hydrocarbures est profond. Les déversements et les fuites d'hydrocarbures peuvent entraîner une contamination des eaux souterraines, une pollution de l'air et des dommages écologiques durables. Prévoir l'ampleur de ces impacts nécessite des techniques de modélisation avancées qui tiennent compte de l'évolution dynamique des scénarios dangereux et de la nature probabiliste des facteurs contributifs.

En réponse à ces défis, les récentes avancées dans les méthodes d'analyse des risques ont mis l'accent sur l'intégration du raisonnement probabiliste, de la modélisation de l'incertitude et de l'analyse dynamique des scénarios. Cette thèse s'appuie sur ces développements en proposant un cadre complet d'analyse des risques des réservoirs de stockage de pétrole dans un contexte d'incertitude. L'approche intègre la méthode Bow-tie avec la Méthodologie pour l'Identification des Grands Risques d'Accidents (MIMAH) et l'améliore par l'intégration de la théorie des ensembles flous, des réseaux bayésiens et de la consultation d'experts.

La méthode Bow-tie, largement reconnue pour sa capacité à représenter les voies causales des événements critiques, est étendue dans cette recherche par sa transformation en un réseau bayésien dynamique (DBN). Cela permet un raisonnement probabiliste et une mise à jour en temps réel des évaluations des risques en fonction de nouvelles preuves. Le cadre DBN capture les interdépendances entre les événements de base, fournissant une compréhension plus nuancée du paysage des risques. En intégrant des réseaux bayésiens, la méthodologie répond aux limites des méthodes traditionnelles d'ADD et d'ADE, offrant un outil flexible et robuste pour l'analyse dynamique des risques.

Pour relever les défis posés par des données incomplètes et imprécises, le cadre proposé intègre la théorie des ensembles flous et le processus analytique hiérarchique flou (FAHP). Ces techniques permettent de quantifier les jugements des experts et d'agréger les évaluations linguistiques en termes probabilistes. L'utilisation d'un FAHP-Modifié garantit une meilleure cohérence et réduit la subjectivité inhérente aux méthodes traditionnelles d'élicitation d'experts. Cette approche hybride favorise une prise de décision éclairée face à l'incertitude, assurant ainsi l'identification et la hiérarchisation des facteurs de risque critiques.

La dimension environnementale des risques liés au stockage des hydrocarbures est traitée à travers une modélisation avancée des conséquences. L'intégration de réseaux bayésiens dynamiques permet de simuler des scénarios dangereux, tels que la dispersion toxique, le rayonnement thermique et les effets de surpression. La thèse intègre également des outils de prévision de l'étendue spatiale des impacts environnementaux, contribuant à la conception de stratégies de mitigation efficaces et de plans d'intervention d'urgence.

Cette recherche apporte une contribution au domaine de la sécurité des procédés en proposant un cadre intégré et innovant pour l'analyse des risques, comblant le fossé entre les méthodes déterministes traditionnelles et les approches probabilistes modernes. La méthodologie proposée est validée à l'aide d'étude de cas réel, notamment l'analyse d'un réservoir de stockage de condensats en Algérie. Les résultats démontrent l'utilité de cette approche pour identifier les scénarios d'accidents critiques, quantifier leurs probabilités et évaluer leurs conséquences.

Les résultats de cette thèse devraient fournir des informations précieuses aux praticiens industriels, aux organismes de régulation et aux décideurs politiques. En améliorant la fiabilité et la précision des évaluations des risques, cette recherche soutient le développement de pratiques plus sûres et plus durables dans l'industrie pétrolière. De plus, les méthodologies et outils présentés dans ce travail ont une applicabilité plus large à d'autres domaines où l'incertitude et

les interactions complexes jouent un rôle significatif dans la gestion des risques.

Cette thèse vise à faire progresser l'état de l'art en matière d'analyse des risques liés au stockage des hydrocarbures en abordant les défis de l'incertitude et de la complexité dynamique. Le cadre intégré proposé améliore non seulement la compréhension théorique des risques, mais offre également des solutions pratiques pour renforcer la sécurité et la résilience des systèmes industriels à enjeux élevés.

CHAPITRE 1

Les risques et leurs impacts environnementaux dans l'industrie pétrolière

1 Introduction

La science du risque joue un rôle central dans la compréhension des incertitudes qui entourent notre monde. À un moment donné, il est souvent impossible de prédire avec précision quels événements pourraient survenir et quelles en seraient les conséquences. Ainsi, l'existence de ces incertitudes engendre des risques, qu'il devient essentiel d'analyser, d'évaluer et de gérer efficacement. L'industrie pétrolière, en particulier, est l'un des secteurs les plus exposés aux risques industriels majeurs, en raison de la nature des substances manipulées et des procédés utilisés. La compréhension du concept de risque, son évolution historique ainsi que la terminologie qui lui est associée sont fondamentales pour appréhender les dangers inhérents aux activités pétrolières. La typologie des risques, qu'ils soient physiques, environnementaux ou technologiques, est particulièrement complexe dans ce secteur. Parmi les installations sensibles, les réservoirs de stockage d'hydrocarbures représentent des enjeux critiques en matière de sécurité et de protection environnementale. Ce chapitre s'attache ainsi à explorer les différents types de risques, leurs mécanismes de survenue et leurs impacts, en s'appuyant sur des études de cas et des analyses d'accidents majeurs.

2 Généralité sur la notion de risque

La notion de risque est complexe et souvent difficile à cerner avec précision. Sa définition peut prêter à ambiguïté, notamment dans des contextes variés où elle se confond fréquemment avec des notions voisines. Cette situation met en évidence l'importance de saisir pleinement le concept de risque, élément clé pour appréhender la littérature en la matière et les recherches qui lui sont liées.

2.1 Évolution du concept “Risque”

Au fil du temps, le concept de risque a évolué d’une vision statique, focalisée sur la simple présence d’un danger, vers une approche dynamique qui intègre les enchaînements causaux menant à des effets néfastes. Cette évolution, qui passe du déterminisme initial aux lois du hasard, met en évidence l’incertitude entourant les causes et leurs conséquences. Comprendre cette transformation est crucial pour adopter une gestion des risques plus proactive et intégrée, basée sur des analyses approfondies et des stratégies efficaces de prévention, de réduction et d’atténuation des risques [Motet, 2010].

La première approche de la notion de risque repose sur une définition statique, où il s’agit d’une situation dans laquelle le danger est présent. Ce dernier est défini comme une source potentielle de dommage pouvant affecter une cible. Deux concepts en découlent : le phénomène dangereux, lié à une situation (par exemple, l’énergie potentielle d’une masse de neige), et la propriété dangereuse, caractéristique d’un acteur supportant le danger (comme la neige accrochée à une montagne). Dans cette perspective, le risque correspond à la présence d’une cible (des personnes, des biens ou autres) exposée à ce danger [Bernstein and Hoffenberg, 1998].

La deuxième définition du risque introduit une approche dynamique, centrée sur l’enchaînement d’événements. Un événement dangereux déclenche la propriété dangereuse d’un acteur (par exemple, une avalanche déclenche l’effet d’une masse de neige), entraînant un événement dommageable qui impacte une cible. Le risque est ainsi défini comme la combinaison de la probabilité d’un dommage et de sa gravité, ce qui déplace l’attention vers les conséquences potentielles sur les cibles. L’estimation du risque devient probabiliste, se focalisant non seulement sur les accidents individuels mais aussi sur ceux pouvant affecter une population entière, mettant en avant des enjeux collectifs [ISO/IEC, 1999].

Dans sa troisième évolution, le terme risque est défini par la norme ISO 31000 comme l’effet de l’incertitude sur l’atteinte des objectifs. Cette définition met l’accent sur les effets de l’incertitude plutôt que sur les dangers ou les conséquences, invitant ainsi à explorer les causes profondes et les aléas inhérents à la réalisation des objectifs fixés. Les objectifs, qu’ils soient de nature technique ou organisationnelle, reposent sur des moyens dont l’efficacité est souvent supposée. Cependant, ces moyens peuvent être affectés par des défaillances, le vieillissement ou des perturbations externes, remettant en question les hypothèses implicites de leur fiabilité [KOVALEVSKY, 2023].

2.2 Définitions du terme “Risque”

La littérature scientifique propose différentes approches pour comprendre le concept de risque. En outre, bien que le risque puisse englober de nombreux aspects, tels que la variabilité des distributions de probabilité, l’impact de l’incertitude sur les objectifs, ou l’exposition au danger et à la perte, l’accent est principalement mis sur la conception du risque comme une combinaison de probabilité et d’impact [Aven, 2024, Cokely et al., 2012].

Dans la section suivante, nous présenterons quelques définitions courantes du terme “risque:

- Une définition qualitative du risque souligne qu’il s’agit de la possibilité qu’un événement négatif se produise, et sa nature varie selon la qualité des informations disponibles [Aven et al., 2018].

- La norme ISO 31000 définit le risque comme étant la combinaison de la probabilité d'occurrence d'un dommage potentiel et de sa gravité, tout en prenant en compte l'origine du phénomène dangereux. Elle considère également le risque comme l'impact de l'incertitude sur les objectifs d'une organisation, affectant ses personnes, ressources, environnement et réputation, ce qui reflète l'incertitude quant aux conséquences d'événements perturbateurs [KOVALEVSKY, 2023].
- Selon l'INRS de la France (Institut national de recherche et de sécurité pour la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles), le risque est défini comme un danger éventuel, plus ou moins prévisible, inhérent à une situation ou à une activité, ainsi que l'éventualité d'un événement futur, incertain ou d'un terme indéterminé, ne dépendant pas exclusivement de la volonté des parties et pouvant causer la perte d'un objet ou tout autre dommage. Ce concept technique de risque s'appuie ainsi sur deux composantes principales : le danger et son potentiel d'effet sur les cibles ou enjeux exposés.
- Le risque selon la Directive Seveso 2 est la probabilité qu'un effet spécifique se produise dans une période donnée ou dans des circonstances déterminées. En conséquence, un risque se caractérise selon deux composantes : la probabilité d'occurrence d'un événement donné, la gravité des effets ou conséquences de l'événement supposé pouvoir se produire.
- Le risque est la combinaison d'un danger dû à la propriété ou à la capacité intrinsèque d'un agent dangereux (équipement, substance, déchet) ou d'une situation dangereuse (contexte de travail), difficilement modifiable, et de l'exposition à ce danger qui, elle, peut-être maîtrisable.
- Le risque est un danger bien identifié, associé à l'occurrence d'un événement ou d'une série d'événements, parfaitement descriptibles, dont on ne sait pas s'ils se produiront mais dont on sait qu'ils sont susceptibles de se produire. Dans certains cas, des outils statistiques appliqués à des séries d'observations systématiques faites dans le passé permettent d'en calculer la probabilité d'occurrence, qui sera alors qualifiée d'objective [Callon et al., 2001].

2.3 Métrique de risque

Il existe plusieurs méthodes de mesure du risque, et la métrique utilisée dépend largement de la nature du risque, qu'il soit économique, industriel, technologique, opérationnel, ou autre. Voici quelques approches couramment citées :

- L'estimation du risque repose sur deux paramètres fondamentaux : la gravité des dommages potentiels et la probabilité de leur occurrence. Cette approche est conforme aux directives décret exécutif n° 21-319 en Algérie, à la norme ISO/IEC 61508 et aux recommandations de la Commission européenne.
- Le triplet (S_i, P_i, C_i) , où S_i représente le i -ème scénario, P_i la probabilité de ce scénario, et C_i la conséquence associée, avec $i = 1, 2, \dots, n$ [Aven et al., 2018].
- Le triplet (C', Q, K) , inclut : C' pour les conséquences spécifiées, Q pour une mesure de l'incertitude associée à C' (généralement la probabilité), et K pour les connaissances de base qui soutiennent C' et Q (y compris une évaluation de la solidité de ces connaissances).

- Conséquences attendues incluent dommages et pertes. Par exemple, elles peuvent être calculées par :
 - (a) Nombre attendu de décès sur une période d'un an (Perte Potentielle de Vie, PLL) ou Le nombre attendu de décès par 100 millions d'heures d'exposition (Taux d'Accidents Mortels, FAR).
 - (b) $P(\text{Evènement dangereux}) \times P(\text{Exposition de l'objet} | \text{Evènement dangereux}) \times E(Dgts | \text{Evènement et exposition})$, c'est-à-dire le produit de la probabilité que l'évènement dangereux se produise et de la probabilité que l'objet concerné soit exposé étant donné que l'évènement se produit, ainsi que des dommages attendus étant donné que l'évènement se produit et que l'objet est exposé.
 - (c) L'utilité attendue est négative.
 - (d) Une distribution de possibilité de dommages.

2.4 Terminologie associée au terme “Risque”

Danger :

Selon la norme ISO 45001, un danger est défini comme une source, situation ou acte ayant le potentiel de causer, dans certaines conditions, des dommages ou des situations dangereuses à des personnes, des biens ou à l'environnement. Il représente la propriété intrinsèque d'un produit, d'un équipement, d'une substance, d'un agent, d'une source d'énergie ou d'une situation susceptible de causer des dommages aux personnes, aux biens ou à l'environnement. En résumé, un danger englobe à la fois les sources potentielles de dommages et les situations présentant un risque inhérent potentiel de dommage [TURMEL, 2024].

Risque majeur :

Le risque majeur est défini comme la possibilité d'un événement d'origine naturelle ou anthropique, dont les effets peuvent mettre en danger un grand nombre de personnes et occasionner des dommages importants, dépassant ainsi les capacités de réaction de la société [Tameur and Djeghar, 2019, Laufer, 1985, Aubry, 2005]. Ce concept repose sur deux éléments clés :

- L'aléa, qui représente la manifestation d'un phénomène potentiellement dangereux, qu'il soit naturel (comme les inondations ou les séismes) ou anthropique (tel que les accidents industriels).
- Les enjeux, qui englobent l'ensemble des personnes, des biens et de l'environnement susceptibles d'être affectés par cet événement.

Un risque majeur, conformément à la norme ISO 31000, désigne un risque dont le niveau dépasse un seuil critique établi selon le contexte spécifique. Ce type de risque se caractérise par sa faible fréquence mais son impact potentiellement très grave, souvent de nombreuses victimes et des dommages considérables aux infrastructures et à l'environnement.

Selon la loi Loi n° 04-20 relative à la prévention des risques majeurs et à la gestion des catastrophes dans le cadre du développement durable, est qualifié de risque majeur toute menace probable pour l'homme et son environnement pouvant survenir du fait d'aléas naturels exceptionnels et/ou du fait d'activités humaines. Il a été répertorié dix risques majeurs pouvant toucher le territoire national qui sont :

- Les séismes et les risques géologiques;
- Les inondations;
- Les risques climatiques (les vents violents, les chutes de pluies importantes, la sécheresse, la désertification, les vents de sable, les tempêtes de neige);
- Les feux de forêts;
- Les risques industriels et énergétiques;
- Les risques radiologiques et nucléaires;
- Les risques portant sur la santé humaine;
- Les risques portant sur la santé animale et végétale;
- Les pollutions atmosphériques, telluriques, marines ou hydriques;
- Les catastrophes dues à des regroupements humains importants.

Risques industriels majeurs :

Le risque industriel se manifeste par des accidents survenant dans des sites industriels, pouvant avoir des conséquences graves pour le personnel, les populations, les biens et l'environnement. Ce risque est particulièrement associé à l'utilisation, au stockage et à la fabrication de substances dangereuses[Sanseverino-Godfrin, 2010]. Plusieurs types d'industries sont classées comme à risque, notamment :

- Industries chimiques : Impliquant la production et l'utilisation de produits chimiques en grandes quantités.
- Industries pétrolières : Englobant toutes les étapes, de la production à la distribution, y compris le raffinage et le stockage.
- Sites pyrotechniques : Concernant la fabrication et le stockage d'explosifs.
- Silos et installations de stockage : Liés aux céréales, grains et autres produits organiques générant des poussières inflammables.
- Autres établissements : Incluant les sites pharmaceutiques et agroalimentaires utilisant des substances dangereuses comme l'ammoniac.

Accident majeur :

C'est un événement tel qu'une émission, un incendie ou une explosion d'importance majeure résultant de développements incontrôlés survenus au cours de l'exploitation d'un établissement entraînant pour la santé humaine, à l'intérieur ou à l'extérieur de l'établissement, ou pour l'environnement, un danger grave, immédiat ou différé, et faisant intervenir une ou plusieurs substances dangereuses [Papadakis and Amendola, 1997].

L'Organisation internationale du travail (BIT) définit l'accident majeur comme "un événement inattendu et soudain, incluant notamment une émission, un incendie ou une explosion de grande envergure, résultant d'un développement anormal dans le cadre d'une activité industrielle. Un tel accident peut engendrer un danger grave, immédiat ou différé, pour les travailleurs, la population ou l'environnement, tant à l'intérieur qu'à l'extérieur de l'installation" [Bureau international du Travail, 1990].

Phénomène dangereux :

Libération d'énergie ou de substance produisant des effets susceptibles d'infliger un dommage à des cibles vivantes ou matérielles. C'est une source potentielle de dommages [INERIS, 2025].

Accident :

Événement non désiré, tel qu'une émission de substance toxique, un incendie ou une explosion résultant de développements incontrôlés survenus au cours de l'exploitation d'un établissement qui entraîne des conséquences/dommages vis-à-vis des personnes, des biens ou de l'environnement et de l'entreprise en général. C'est la réalisation d'un phénomène dangereux, combinée à la présence de cibles vulnérables exposées aux effets de ce phénomène [INERIS, 2025].

Aléa :

Probabilité qu'un phénomène accidentel produise en un point donné des effets d'une intensité donnée au cours d'une période déterminée. L'aléa est spatialisé et peut être cartographié [INERIS, 2025].

Enjeux :

Éléments vulnérables tels que les personnes, les biens matériels ou les différentes composantes du milieu naturel (faune, flore, ressources naturelles...) susceptibles, du fait de l'exposition au danger, de subir des dommages [INERIS, 2025].

Effets d'un phénomène dangereux :

Ce terme décrit les caractéristiques des phénomènes physiques, chimiques associés à un phénomène dangereux concerné : flux thermique, concentration toxique, surpression. L'intensité des effets d'un phénomène dangereux peut être mesurée physiquement à partir de seuils d'effets moyens conventionnels sur des types d'éléments vulnérables ou cibles tels que l'homme », les structures. Elle ne tient pas compte de l'existence ou non de cibles exposées [INERIS, 2025].

Gravité des dommages :

On distingue l'intensité des effets d'un phénomène dangereux de la gravité des dommages découlant de l'exposition de cibles de vulnérabilités données à ces effets. La gravité des dommages potentiels prévisibles sur les enjeux (personnes, biens matériels, environnement), résulte de la combinaison en un point de l'espace de l'intensité des effets d'un phénomène dangereux et de

la vulnérabilité des enjeux potentiellement exposées. Autrement dit, c'est une mesure des conséquences découlant de l'exposition d'éléments vulnérables (enjeux) aux effets d'un phénomène dangereux [INERIS, 2025].

Probabilité d'occurrence :

La probabilité d'occurrence d'un phénomène dangereux est obtenue par association des probabilités des scénarios conduisant à ce phénomène. Elle correspond à la probabilité d'avoir des effets d'une intensité donnée (et non des dommages). Autrement dit, c'est le degré de vraisemblance qu'un événement dangereux se produise ; fréquence d'un phénomène [INERIS, 2025].

Intensité :

Mesure physique de l'intensité d'un phénomène dangereux. La mesure de l'intensité se traduit par la détermination des distances d'effet des phénomènes. Elle ne tient pas compte des cibles exposées [INERIS, 2025].

Criticité du risque :

La représentation traditionnelle du risque identifie les sources de dangers et les classe en fonction de leur fréquence (probabilité) et de leur gravité (conséquences), à l'aide d'une matrice à deux dimensions [INERIS, 2025].

Vulnérabilité :

L'appréciation du rapport entre les effets d'un danger auquel est exposé une cible et les dommages qu'elle subit. Dans le cas d'une zone, la vulnérabilité est l'appréciation de la sensibilité moyenne de l'ensemble des cibles à un type d'effet donné [INERIS, 2025].

Prévention :

C'est une attitude et/ou l'ensemble de mesures à prendre consistant à limiter le risque, visant à prévenir ce risque en annulant ou en diminuant la probabilité d'occurrence du phénomène dangereux [INERIS, 2025].

Protection :

La protection regroupe l'ensemble des mesures visant à limiter l'étendue ou/et la gravité des conséquences d'un phénomène dangereux, sans en modifier la probabilité d'occurrence par exemple, les équipements de protection individuelle [INERIS, 2025].

Domage :

Le terme dommage est défini comme un préjudice ou un dégât causé à une personne ou à un bien, résultant d'une action nuisible causés par des accidents, des catastrophes naturelles ou des actes de malveillance. Il peut se manifester sous diverses formes, notamment comme un dommage matériel, moral ou corporel [INERIS, 2025].

Management du risque :

La norme ISO 31000 définit le management des risques comme un ensemble d'activités coordonnées visant à diriger et piloter un organisme face aux risques. Ce processus systématique inclut l'identification, l'analyse, l'évaluation et le traitement des menaces ou incertitudes pouvant affecter une organisation. En analysant la probabilité et l'impact des risques, les organisations peuvent développer des stratégies pour minimiser les dommages tout en maximisant les oppor-

tunités. L'objectif est d'optimiser le succès en intégrant le management des risques dans toutes les activités de l'entreprise, ce qui permet non seulement de contrôler les menaces, mais aussi de tirer parti des opportunités, contribuant ainsi à la création et à la protection de valeur pour l'organisation [ISO/IEC, 1999].

Incertitude :

L'incertitude, dans le contexte du risque, se réfère à l'état de connaissance limitée concernant les résultats potentiels, rendant difficile la prévision des événements futurs ou de leurs probabilités. Elle implique de l'ambiguïté et de l'imprévisibilité, résultant d'informations incomplètes ou de situations complexes où plusieurs résultats sont possibles. L'incertitude présente des défis dans la prise de décision car elle manque de probabilités claires et d'impacts mesurables [Reghezza-Zitt, 2015].

Hydrocarbure :

Un composé chimique organique constitué d'hydrogène et de carbone. Il existe une grande variété d'hydrocarbures, tels que le pétrole brut (essentiellement un mélange complexe d'hydrocarbures), le méthane, le propane, le butane, et autres. Ils sont souvent utilisés comme combustibles [Cicoella, 2008].

2.5 Distinction entre risque, danger et incertitude

La distinction entre risque, danger et incertitude est cruciale pour une compréhension approfondie des situations complexes, notamment dans le cadre de la gestion des risques. Le risque se définit comme la probabilité qu'un événement indésirable se produise, combinée à la gravité de ses conséquences. Il est mesurable et peut être évalué à l'aide de données statistiques et d'analyses quantitatives. Par exemple, dans un contexte industriel, le risque d'accident peut être calculé en tenant compte des antécédents d'incidents et des conditions opérationnelles.

En revanche, le danger désigne une source potentielle de préjudice ou de dommage. Il représente un élément intrinsèque capable de provoquer des effets néfastes. Par exemple, une substance chimique toxique constitue un danger en raison de ses propriétés intrinsèques, tandis que le risque associé à son utilisation dépend des conditions spécifiques dans lesquelles elle est manipulée. Ainsi, le danger est statique et lié à la nature de l'élément en question, alors que le risque est dynamique et contextuel.

Enfin, l'incertitude englobe les situations où les résultats d'une action ou d'un événement ne peuvent pas être prévus avec précision. Contrairement au risque, qui peut être quantifié par des probabilités, l'incertitude implique un manque d'informations ou de connaissances sur les facteurs en jeu. Ce manquement peut entraver la prise de décision efficace pour une bonne gestion des risques, car l'absence de connaissances suffisantes pour établir des probabilités précises crée un climat d'incertitude qui expose les décideurs à des dangers et des risques potentiels. De plus, l'incertitude radicale (où il est impossible d'établir une liste exhaustive des événements possibles liés à un aléa) intensifie ce danger. Face à ces défis, il devient essentiel de développer des stratégies adaptées pour atténuer les risques associés à l'incertitude, permettant ainsi aux décideurs de mieux naviguer dans des environnements complexes et incertains [Aven and Renn, 2009, Aven, 2016].

3 Typologie des risques

L'industrie pétrolière et gazière est soumise à une multitude de risques qui peuvent gravement affecter ses opérations et nécessitent une gestion proactive. Les activités de développement et d'extraction des hydrocarbures, ainsi que le système de stockage associé, sont particulièrement exposés à des dangers variés, allant des accidents techniques aux enjeux environnementaux. Ce secteur, qui mobilise d'importantes ressources humaines et financières, fait face à un taux élevé d'accidents et de catastrophes. Par conséquent, il est essentiel d'identifier et de classer ces risques pour minimiser les dangers potentiels et garantir une production efficace et rentable. Une typologie des risques permet non seulement d'analyser les menaces spécifiques rencontrées dans le cadre des opérations pétrolières, mais aussi de développer des stratégies adaptées pour leur atténuation.

La classification des risques est une étape importante pour assurer une gestion efficace des menaces dans l'industrie pétrolière et gazière. En adoptant une approche méthodique qui prend en compte les risques physiques, cybernétiques et réglementaires, il devient possible d'améliorer la sécurité des opérations tout en protégeant les individus et en préservant l'environnement [Oudina et al., 2024, Yanting and Liyun, 2011].

3.1 Classification générale des risques dans l'industrie pétrolière et gazière

Le secteur pétrolier et gazier se caractérise par des activités d'extraction et de production complexes, souvent réalisées dans des environnements hostiles. Les opérations reposent sur trois composantes essentielles : les ressources humaines, l'environnement et les infrastructures matérielles. Cette classification des risques s'appuie sur ces éléments fondamentaux et prend en compte les dimensions environnementales, humaines, économiques et sécuritaires.

(a) Risques environnementaux naturels

- Risques climatiques: Dans de nombreux cas, les conditions climatiques affectent l'étendue des opérations pétrolières. Par exemple, les opérations de forage sont fortement compromises en cas de pluie ou de neige, et il existe un risque élevé de coup de chaleur lors d'opérations pétrolières par temps très chaud.
- Risques géologiques: Des facteurs tels que la structure et la complexité du réservoir pétrolier, les réserves et l'abondance du réservoir, la nature du réservoir, la profondeur d'enfouissement, la pression initiale de formation, la perméabilité, la porosité active, ainsi que les conditions de cavités, de failles et la dureté des roches souterraines affectent le déroulement et la qualité des opérations pétrolières.

(b) Risques d'ingénierie

- Risques d'exploration: Des facteurs tels qu'une utilisation inappropriée des méthodes d'exploration, une interprétation inexacte des données sismiques et un positionnement incorrect des puits d'exploration peuvent entraîner des pertes pour l'entreprise pétrolière.
- Risques de développement: Des éléments tels qu'une méthode d'exploitation inappropriée, des retards dans le progrès, des modifications de conception technique et des problèmes techniques durant le développement peuvent également

causer des pertes pour l'entreprise pétrolière. Par exemple, une mauvaise compréhension du stratum, des dommages à la tubulure, une pression de formation trop élevée et un manque de sensibilisation au contrôle des puits sont autant de facteurs qui présentent de grands risques pour les opérations pétrolières.

- Risques de construction: Le risque de construction se réfère aux pertes causées par des facteurs tels que les défauts techniques, l'inadéquation de l'équipement et l'allongement des délais de construction lors du processus de construction.

(c) Risques HSE (Santé, Sécurité et Environnement)

- Santé : Les travailleurs sont exposés à des dangers variés, notamment :
 - Accidents de la route, qui représentent 40 % des décès au travail.
 - Incidents liés à des objets en mouvement, causant 60 % des accidents mortels sur site.
 - Risques d'explosions et d'incendies dus aux gaz combustibles.
 - Exposition chimique dans des zones restreintes comme les réservoirs de pétrole.
- Sécurité : Les risques de sécurité incluent :
 - Accidents humains et de véhicules.
 - Explosions, incendies et dangers liés aux équipements.
 - Conditions maritimes imprévisibles pour le personnel offshore.
- Environnement : Les différentes étapes de l'exploration pétrolière ont un impact direct sur l'environnement :
 - Les études géologiques peuvent perturber les espèces aquatiques.
 - Les émissions polluantes lors du développement et de la production affectent les écosystèmes marins.
 - Les fuites de pétrole causent une contamination significative des sols.

(d) Risques managériaux

- Erreurs humaines: les risques liés aux erreurs humaines représentent une cause majeure d'accidents dans l'industrie pétrolière et gazière. Selon les statistiques, 70 % à 80 % des accidents sont causés par des erreurs humaines ou des opérations illégales. Des facteurs tels que le manque de formation adéquate, la qualité globale des employés, leur niveau opérationnel, leur âge et leurs compétences en gestion influencent directement la sécurité des opérations, soulignant l'importance d'une culture organisationnelle solide et d'un leadership efficace.
- Risques organisationnels: des éléments tels que des mécanismes organisationnels déraisonnables, un personnel inapproprié et une répartition irrationnelle des responsabilités affectent également les opérations pétrolières. De plus, le risque organisationnel peut survenir en raison d'une compréhension différente, d'attitudes et d'actions variées au sein des secteurs impliqués dans les opérations pétrolières.

(e) Risques Commerciaux

- **Risque financier** : La volatilité des prix du pétrole affecte directement la rentabilité des entreprises du secteur. Les coûts d'extraction et de raffinage influencent également les prix du marché. Les opérations pétrolières ont un cycle long, une large distribution géographique, un grand nombre d'employés et un montant élevé de fonds. Par conséquent, les entreprises pétrolières font face à des incertitudes telles que le financement, la rotation des fonds, les taux d'intérêt et les taux de change au cours des opérations pétrolières.
- **Risque économique** : Les fluctuations de l'offre et de la demande peuvent avoir un impact significatif sur le secteur, rendant essentiel une gestion efficace des ressources.
- **Risque de marché** : Les changements dans l'environnement économique externe et un marché incertain peuvent entraîner des pertes pour les opérations pétrolières. Par exemple, la hausse des prix des matériaux de travail et du carburant augmentera les coûts d'exploitation, diminuant ainsi l'efficacité des opérations pétrolières.

3.2 Classification des risques associés aux systèmes Cyber-Physiques dans l'industrie pétrolière et gazière

Cette classification est basée sur le fait que le système cyber-physique constitue le composant central de l'industrie pétrolière et gazière, et que les risques associés sont soit de nature physique, cybernétique ou liés à la permissibilité et à l'autorisation pour les entreprises du secteur.

(a) Risques physiques

Les risques physiques représentent une menace pour les installations, les équipements et le personnel, entraînant divers types de dommages, tels que la destruction, les incendies et le vandalisme. Parmi les principaux risques identifiés, on trouve :

- **Attaques de réservoirs** : Tous types de réservoirs de stockage sont vulnérables à des attaques qui peuvent tromper les capteurs de niveau, entraînant ainsi des débordements.
- **Exfiltration de données de production** : L'utilisation de logiciels malveillants permet aux attaquants d'accéder à des données sensibles concernant la production des puits, compromettant ainsi la sécurité opérationnelle.
- **Attaques par drones** : Des incidents récents ont démontré que des drones peuvent perturber considérablement la production mondiale de pétrole, soulignant la nécessité d'une vigilance accrue face à ces nouvelles menaces.
- **Piraterie** : La piraterie maritime est influencée par des facteurs politiques et économiques instables, affectant les infrastructures offshore.
- **Terrorisme** : Les installations pétrolières sont des cibles privilégiées pour les attaques terroristes, visant à perturber les intérêts nationaux.

(b) Risques cybernétiques

Les menaces cybernétiques sont omniprésentes dans l'industrie pétrolière et gazière, représentant un risque croissant pour la sécurité des opérations. Ces menaces se

manifestent particulièrement lors de la phase d'exploration, où des malwares peuvent infiltrer les systèmes pour voler des données sismiques concurrentielles. Parmi les risques majeurs, on retrouve :

- Attaques par déni de service (DoS): L'automatisation accrue expose les entreprises du secteur à des vulnérabilités en matière de cybersécurité. Ces attaques visent à rendre les systèmes inaccessibles en inondant les dispositifs de requêtes, compromettant ainsi la disponibilité des services essentiels.
- Injection de commandes : Ce type d'attaque cible les systèmes de contrôle industriel en bloquant ou en jouant des commandes, ce qui peut perturber gravement les opérations.
- Exfiltration et falsification de données : La divulgation illégale d'informations sensibles peut être réalisée par des acteurs internes ou externes, mettant en péril la confidentialité et l'intégrité des données critiques.

(c) Risques d'autorisation

Ces risques sont liés à l'accès humain et matériel non autorisé aux installations. Ils comprennent :

- Accès interne non sécurisé : Le manque de sensibilisation aux menaces parmi les employés peut accroître la vulnérabilité du réseau.
- Accès externe : Les systèmes SCADA tiers doivent être surveillés pour éviter les changements non autorisés qui pourraient compromettre la sécurité.

4 Risques liés aux stockages d'hydrocarbures

4.1 Hydrocarbures pétroliers

Les hydrocarbures pétroliers (HP), également appelés combustibles fossiles, proviennent de sources minérales naturelles telles que le bitume, le charbon et le pétrole brut. L'origine des HP est liée à la dégradation anaérobie de matières organiques issues d'organismes vivants, soumises pendant des millions d'années à la chaleur et à la pression dans la croûte terrestre. Ils contiennent une grande diversité de mélanges et de concentrations de composés chimiques organiques, principalement constitués d'hydrogène et de carbone, avec de plus faibles quantités d'oxygène, de soufre et d'azote. Les hydrocarbures pétroliers sont classés en hydrocarbures à chaîne courte (aromatiques, alicycliques et paraffiniques), en gasoil (n-paraffines, isoparaffines, naphènes et aromatiques), en kérosène et en essence [Haider et al., 2021].

4.1.1 Pétrole brut

Les pétroles bruts sont principalement constitués d'hydrocarbures à chaîne courte. Ils sont composés de mélanges complexes d'hydrocarbures paraffiniques, alicycliques et aromatiques, ainsi que d'une plus faible proportion de composés non hydrocarbonés tels que des acides naphéniques, des phénols, des thiols, de l'azote hétérocyclique, des composés soufrés, ainsi que des métallo-porphyrines et des asphaltènes. Le pétrole brut, en tant que mélange complexe, est produit par la décomposition incomplète de la biomasse végétale et animale sur une longue période. La teneur en carbone se situe dans la plage de 83 à 87 %, et la teneur en hydrogène

varie entre 10 et 14 %. De plus, de petites quantités variables d'azote, d'oxygène, de soufre et de métaux (Ni et V) sont présentes dans les pétroles bruts [Ahmed and Fakhruddin, 2018, Mohammadi et al., 2020].

4.1.2 Gasoil

Les gasoils sont des distillats moyens du pétrole brut séparés par distillation fractionnée. Les autres distillats moyens comprennent le kérosène et le carburant aviation. Le nombre de carbone des hydrocarbures du gasoil se situe entre 11 et 25, et la plage de distillation se situe entre 180 et 380 °C. Le gasoil contient de 2000 à 4000 hydrocarbures, qui ne peuvent pas être totalement séparés par chromatographie en phase gazeuse. Il comprend environ 64 % d'hydrocarbures aliphatiques, 1 à 2 % d'hydrocarbures oléfiniques et 35 % d'hydrocarbures aromatiques [Ahmed and Fakhruddin, 2018]. Il est composé de quatre classes structurales principales d'hydrocarbures :

- N-alcanes ou n-paraffines (hydrocarbures saturés linéaires).
- Isoalcanes ou isoparaffines (hydrocarbures saturés ramifiés).
- Cycloalcanes ou naphtènes (alcanes cycliques saturés).
- Aromatiques.

4.1.3 Essence

Le terme « essence » est un terme générique utilisé pour décrire les carburants pétroliers volatils et inflammables utilisés principalement dans les moteurs à combustion interne pour alimenter les voitures particulières et d'autres types de véhicules, tels que les autobus, les camions, les motos et les avions. Dans la composition de l'essence, les composés aromatiques représentent environ 50 % de la teneur totale en hydrocarbures. Les iso-alcanes représentent environ 35%, les alcanes, les alcènes et les cycloalcanes étant présents en quantités mineures. Sa plage de distillation est de 30 à 35 °C à 180 à 200 °C. Il s'agit d'un mélange complexe de composés d'hydrocarbures volatils de (C4-C12) avec une plage de points d'ébullition nominaux de 50 à 200 °C (USA) ou de 25 à 220 °C (Europe) pour l'essence automobile. L'essence est très inflammable ; il s'enflamme très facilement, s'évapore rapidement et forme des mélanges explosifs avec l'air. La plupart des gens peuvent commencer à sentir l'essence à 0,25 partie d'essence par million de parties d'air (ppm) et il ne se dissout pas facilement dans l'eau [Ahmed and Fakhruddin, 2018].

4.1.4 Kérosène

Le kérosène est un mélange liquide de composés chimiques obtenu par la distillation du pétrole brut. Il constitue un composant majeur (plus de 60 %) des carburants d'aviation (carburateurs), est employé dans les systèmes de chauffage central « au mazout » et peut servir d'agent de nettoyage ou de solvant. Le kérosène contient des hydrocarbures dont le nombre d'atomes de carbone est compris entre 11 et 12 (C11-C12). Il est inflammable et pratiquement insoluble dans l'eau [Ahmed and Fakhruddin, 2018].

4.1.5 Huiles lourdes

Les huiles lourdes sont des substances naturelles contenant des hydrocarbures qui sont synthétisés par des organismes vivants, représentant généralement moins de 20 % en poids du pétrole et des substances apparentées. Elles constituent le résidu de la distillation du pétrole brut et leur composition est la suivante : carbone 88 %, hydrogène 10 %, soufre 1 %, H₂O 0,5 %, cendres 0,1 % en poids. Elles peuvent également contenir des particules solides ou semi-solides dispersées (asphaltènes, minéraux et autres résidus de la source pétrolière, particules métalliques provenant des équipements de raffinage et certains déchets chimiques déversés), ainsi qu'environ 0,5 % d'eau. Elles laissent un résidu charbonneux dans les réservoirs et peuvent contenir jusqu'à 5 % de soufre. Les constituants limités des huiles lourdes qui se dissolvent dans l'eau deviennent biodisponibles en cas de rejet dans l'environnement. Les huiles lourdes ne sont pas facilement biodégradables et sont également mutagènes [Ahmed and Fakhruddin, 2018].

4.2 Réservoirs de stockage des hydrocarbures

Le transport et le stockage constituent des secteurs stratégiques dans l'industrie pétrolière. Les réservoirs de stockage sont nécessaires à l'exploitation des champs pétroliers, car ils permettent d'éviter les interruptions de production dues aux arrêts du transport des produits pétroliers vers les installations de stockage situées sur les côtes ou à proximité des unités de transformation. Le stockage régule les systèmes de transport des hydrocarbures, que ce soit par canalisation ou par d'autres moyens, et inclut également un traitement pour la décantation, qui consiste à éliminer l'eau et à comptabiliser la quantité de pétrole brut à expédier. Les principaux types de réservoirs utilisés pour le stockage de liquides et de gaz liquéfiés dans l'industrie pétrolière et gazière sont :

- Les réservoirs de stockage atmosphériques;
- Les réservoirs de stockage à basse pression;
- Les récipients de stockage sous pression ou à pression réfrigérée;
- Et les réservoirs de stockage réfrigérés.

Dans notre recherche, nous nous intéressons particulièrement aux réservoirs (Bacs) de stockage atmosphériques.

4.2.1 Éléments techniques communs aux bacs de stockage atmosphériques

Les réservoirs (ou bacs) atmosphériques sont conçus pour stocker des liquides à une pression proche de celle de l'atmosphère, permettant ainsi de contenir de grands volumes tout en minimisant les coûts d'investissement. Ils sont généralement de forme cylindrique et se composent de plusieurs éléments essentiels : un fond, une robe ou virole, un toit (qui peut être fixe ou flottant), ainsi que divers accessoires tels que des échelles d'accès, des soupapes de sécurité, des systèmes de protection contre l'incendie, les trous d'hommes, des réchauffeurs et autres.

(a) Fond de bac

Il a pour fonction principale d'assurer l'étanchéité et de transférer la charge verticale, générée par le liquide stocké, vers la fondation. Le fond des réservoirs, souvent

constitué de tôles soudées de forme rectangulaire, présente une épaisseur minimale comprise entre 6 et 6,5 mm. Certains fonds de bacs sont protégés par une peinture bitumineuse appliquée à l'intérieur. Le fond repose sur une couche de gravier ou de sable, elle-même recouverte d'un enrobé bitumineux. Ce revêtement assure à la fois l'étanchéité et une adaptation efficace au contact des tôles de fond, garantissant ainsi la stabilité et la durabilité de l'assemblage.

Le fond du bac est conçu pour permettre une vidange aussi complète que possible, ainsi que l'évacuation de l'eau et des dépôts. Cette opération s'effectue à l'aide d'une tuyauterie traversant la robe et débouchant dans une cuvette installée au point le plus bas du fond. À cet effet, le fond est construit de manière à être légèrement conique, avec une pente d'environ 1 à 2 %, orientée soit vers le centre (fond concave), soit vers la périphérie (fond convexe).

La bordure périphérique du fond du bac, placée sous la robe et soudée à celle-ci, est soumise à des contraintes importantes dues à la pression hydrostatique horizontale exercée sur le bas de la robe. En fonction des critères définis par les codes de construction, il peut être nécessaire d'ajouter une tôle annulaire de bordure sous la robe. Cette tôle est composée de segments de tôles rayonnants, soudés bout à bout, et est généralement plus épaisse que le reste du fond afin de mieux résister aux contraintes mécaniques [Chibane, 2016, IAP-UFO, 2016].

(b) **Robe de bac**

La robe de bac est constituée d'un empilage vertical de bandes de tôle rectangulaires, appelées viroles soudées bout à bout, mesurant entre 1,8 et 2,4 mètres de large et pouvant atteindre jusqu'à 10 mètres de long. Elle est conçue pour résister à la pression latérale exercée par le liquide stocké. En plus de cette contrainte, la robe est conçue pour supporter les effets du vent et des tremblements de terre. La conception de la robe prend en compte des variations d'épaisseur des viroles, allant de 5 à 45 mm selon les normes de construction, afin d'assurer une résistance adéquate. Sa valeur dépend des dimensions du bac, de la masse volumique du produit stocké, des caractéristiques mécaniques des aciers employés, des coefficients de sécurité imposés par le code, de la température d'étude et de la surépaisseur de corrosion retenue. Les tôles qui composent la robe sont disposées en rangées superposées avec des joints verticaux décalés pour renforcer l'intégrité structurelle. La liaison entre la robe et le fond du bac est réalisée par une double soudure d'angle, un point soigneusement conçu pour résister à la pression hydrostatique et aux mouvements induits. Le schéma ci-dessous montre que l'épaisseur de la robe varie de la base au sommet [Chibane, 2016, IAP-UFO, 2016].

(c) **Toit**

Le sommet des réservoirs est recouvert d'un toit qui est fait d'un assemblage de tôles, il peut être fixe ou flottant.

(d) **Cuvette**

Les installations de rétention ou cuvette de rétention, conçues pour contenir les fuites accidentelles de substances potentiellement polluantes, se composent généralement de murs et d'une base, formant un compartiment autour des zones de manipulation ou de stockage. Selon la norme EN 14620-1, ces structures peuvent être construites en terre

ou en béton et doivent entourer le réservoir de stockage à une distance adéquate pour assurer la sécurité. L'EPA (Environmental Protection Agency) souligne leur rôle essentiel dans la prévention de la contamination environnementale en retenant tout liquide déversé jusqu'à ce qu'une action corrective soit entreprise. De plus, les bassins de rétention sont souvent structurellement indépendants du réservoir principal, ce qui optimise leur efficacité [Trávníček et al., 2021].

4.2.2 Types de bacs de stockage atmosphériques

Les réservoirs atmosphériques sont généralement choisis en fonction du point d'éclair du liquide stocké. Les deux principaux types de réservoirs atmosphériques sont les réservoirs à toit flottant et les réservoirs à toit fixe :

(a) Réservoirs à toit flottant

Les réservoirs à toit flottant sont spécialement conçus pour le stockage de produits volatils dont la tension de vapeur absolue à température ambiante est comprise entre 0.1 et 0.75 bar où dont le point éclair est inférieur à 55°C tels que le pétrole brut, des naphthas, des diverses essences et carburants et autres, avec une capacité pouvant dépasser 35 000 m³. Leur structure est similaire à celle des réservoirs à toit fixe, mais leur toit est distinct. Dans ces réservoirs, le toit repose directement sur le liquide et est soutenu par des béquilles, flottant grâce à des doubles fonds contenant des poches d'air, ce qui allège son poids par rapport au liquide stocké. Pour réduire les pertes par évaporation, la circonférence du toit est rendue étanche grâce à des bandes en caoutchouc qui glissent sur la paroi interne du réservoir.

Les réservoirs à toit flottant présentent plusieurs avantages notables : ils permettent de réduire les pertes par évaporation, diminuent les risques d'incendie et limitent la pollution atmosphérique, notamment les odeurs. Ces réservoirs comprennent une structure flottante qui s'ajuste aux variations du niveau du liquide, que ce soit dans un bac ouvert ou dans un bac à toit fixe [IAP-UFO, 2016].

Il existe deux types principaux de réservoirs à toit flottant :

- Bacs à toit flottant externe :

Les bacs à toit flottant externe sont des réservoirs conçus avec un toit installé à l'air libre dans des bacs ouverts, où la face inférieure du toit est constamment mouillée par le liquide stocké. Cette conception élimine presque complètement l'espace de vapeur, réduisant ainsi considérablement les pertes par évaporation et les risques d'incendie. Ces réservoirs se composent d'une coque en acier cylindrique et d'un toit qui flotte directement sur le produit, s'élevant et s'abaissant en fonction du niveau du liquide. Contrairement aux réservoirs à toit fixe, il n'y a presque pas d'espace de vapeur entre la plaque flottante et la surface du liquide, ce qui contribue à minimiser les pertes par respiration.

Le système de toit flottant comprend un pont, des accessoires et un système de joint d'étanchéité, ce dernier étant situé entre la coque du réservoir et le toit, fixé au périmètre du pont et en contact avec la paroi du réservoir pour réduire l'évaporation au niveau du joint. Les ponts flottants actuellement utilisés sont fabriqués en plaques d'acier soudées et se déclinent en trois types généraux

: type ponton à simple pont, type double pont, et toits spéciaux à bouée et renforcés radialement. Ces réservoirs sont généralement employés pour stocker de grandes quantités de produits pétroliers tels que le pétrole brut, le condensat, l'essence et le kérosène, dans des réservoirs ouverts en acier d'une capacité supérieure à 20 000 m³.

L'objectif principal des réservoirs à toit flottant externe est de garantir un stockage sûr et efficace des produits volatils tout en minimisant les pertes de vapeur dans l'environnement. Grâce à leur conception, ces réservoirs sont particulièrement efficaces pour réduire les émissions de composés organiques volatils (COV) et autres polluants atmosphériques potentiels, contribuant ainsi à des considérations environnementales, économiques et sécuritaires. Toutefois, il est important de noter que l'accumulation de neige sur le toit peut poser des problèmes, et que le coût de construction d'un réservoir à toit flottant est généralement plus élevé que celui d'un réservoir à toit fixe ; cependant, cela peut être compensé par la réduction des pertes par évaporation [Moshashaei et al., 2017].

- Bacs à toit flottant interne :

Les réservoirs à toit flottant interne disposent d'un toit fixe permanent sur lequel repose un toit flottant à l'intérieur, flottant ainsi directement sur le produit dans un réservoir à toit fixe. Ce type de réservoir a été développé au milieu des années 1950 pour protéger le toit flottant des intempéries, y compris des coups de foudre. Les réservoirs à toit flottant interne sont également connus sous plusieurs appellations, telles que réservoir de stockage à toit flottant interne, réservoir de pétrole à toit flottant, ou réservoir de plaque flottante interne. Le toit interne, souvent désigné sous le terme de « pan », flotte à la surface du liquide, monte et descend en fonction des variations de niveau. Ce pan peut reposer sur des pontons ou être constitué d'un double pont pour assurer sa flottabilité.

Ces réservoirs sont respectueux de l'environnement. L'espace de vapeur situé au-dessus du toit flottant et en dessous du toit fixe comprend des événements de circulation permettant une ventilation naturelle, réduisant ainsi l'accumulation de vapeurs de produit et la formation potentielle d'un mélange combustible. Les réservoirs à toit flottant interne sont généralement fabriqués en aluminium, en acier inoxydable ou dans d'autres matériaux pour prévenir la volatilisation du liquide et sont largement utilisés pour stocker des produits tels que l'essence, le kérosène d'aviation et d'autres liquides chimiques volatils.

Il existe deux types fondamentaux de réservoirs à toit flottant interne : ceux dans lesquels le toit fixe est soutenu par des colonnes verticales à l'intérieur du réservoir, et ceux avec un toit fixe autoportant sans colonnes de soutien internes. Ces conceptions permettent d'optimiser le stockage tout en garantissant la sécurité et l'efficacité dans la gestion des produits volatils [Taveau, 2011].

Avantages :

- Réduction des pertes par évaporation du liquide.
- Limitation des émissions de composés organiques volatils (COV), contribuant à une meilleure gestion environnementale.
- L'espace vapeur limité réduit le volume de vapeurs inflammables, diminuant ainsi le risque d'explosion interne.

Inconvénients:

- Accumulation possible d'eau de pluie ou de neige sur le toit, pouvant entraîner un enfoncement du toit.
- L'espace vapeur réduit peut entraîner des contraintes opérationnelles, notamment lors de variations de volume ou de pression, nécessitant une gestion plus rigoureuse et précise.

- **Les réservoirs à toit fixe**

Les réservoirs à toit fixe se caractérisent par un toit fixe qui permet une meilleure conservation des produits peu volatils, dangereux ou polluants, tels que le fioul et le bitume, tout en empêchant leur contamination par des agents extérieurs comme la pluie et les poussières. Ces réservoirs sont constitués d'une coque en acier de forme cylindrique, où la partie inférieure contient le liquide stocké et la partie supérieure comprend l'espace vapeur, dont la concentration dépend de la pression de vapeur du produit. Les pertes provenant des réservoirs à toit fixe sont causées par des variations de température, de pression et de niveau de liquide. Ils sont couramment utilisés dans les installations de production pour stocker des hydrocarbures ayant des pressions de vapeur proches de la pression atmosphérique. En réalité, ces réservoirs peuvent être isolés et utilisés pour stocker des liquides tels que l'asphalte, les combustibles marins et d'autres liquides lourds et visqueux. De plus, ce type de réservoir est soit ventilé librement, soit équipé d'un évent de pression, permettant ainsi aux réservoirs de fonctionner à une légère pression interne ou sous vide afin d'éviter la libération de vapeurs lors de très faibles variations de température, de pression ou de niveau de liquide [Moshashaei et al., 2017].

Les réservoirs à toit fixe se classe en deux catégories [Taveau, 2011] :

- Réservoirs à toit supporté : Ces toits sont constitués d'une charpente soutenue par un ou plusieurs poteaux (pour des diamètres supérieurs à 25 mètres) qui s'appuient sur le fond du réservoir;
- Réservoirs à toit autoportant : sont soit coniques soit à toit en dôme.

Avantages :

- Conception simple, sans pièces mobiles.
- Entretien minimal requis.

Inconvénients :

- Exposé à des pertes par évaporation du liquide stocké.
- Présence d'un grand espace vapeur, augmentant le risque d'explosion interne en cas d'inflammation des vapeurs inflammables.

4.3 Risques associés aux bac de stockage atmosphérique des hydrocarbures

Ces dépôts de stockage présentent un risque inhérent lié à la nature inflammable des produits qu'ils contiennent. Toutefois, l'association entre le mode de stockage et les volumes entreposés confère aux phénomènes dangereux susceptibles de s'y produire

des caractéristiques particulières. Des incidents traditionnels liés à l'utilisation de matières inflammables, tels que des incendies ou des explosions, peuvent survenir, mais avec une intensité ou une durée amplifiée en raison des quantités stockées. Les catastrophes de Buncefield (2005) et de Jaipur (2008) en constituent des exemples tragiques. Par ailleurs, des phénomènes plus spécifiques, directement associés à la conservation de liquides inflammables dans des conteneurs atmosphériques, peuvent également se produire (tels que le boil-over, la pressurisation ou l'explosion du bac). De ce fait, les dépôts de stockage d'hydrocarbures liquides se distinguent des autres infrastructures pétrolières. Face à ces enjeux, c'est important de bien définir les effets de ces phénomènes en tenant compte des spécificités propres à ces installations.

4.3.1 Risques liés au stockage des hydrocarbures

Le stockage des hydrocarbures présente divers risques, qui varient en fonction du produit stocké et du type de stockage. Parmi les risques associés aux défaillances des réservoirs atmosphériques, on distingue cinq types majeurs, souvent soudains et catastrophiques : les effondrements, les implosions, les explosions, les incendies et les fuites accidentels.

Ci-après, certains risques peuvent se produire au niveau des bacs de stockage des hydrocarbures :

(a) Effondrement ou rupture catastrophique :

L'effondrement des réservoirs atmosphériques représente un risque majeur dans le stockage de liquides. En se basant sur des exemples historiques significatifs, notamment la défaillance d'un réservoir de stockage de fertilisants liquide en 2008 dans l'installation d'Allied Terminals à Chesapeake, en Virginie. Le réservoir, conçu initialement pour des produits pétroliers, a éclaté alors qu'il était rempli d'une solution à 32% d'urée-nitrate d'ammonium (UAN), entraînant des blessures graves pour deux soudeurs travaillant sur le réservoir [Moshashaei et al., 2017].

Les défaillances catastrophiques des réservoirs atmosphériques peuvent être attribuées aux raisons suivantes [Schmidt, 2017, Klein and Vaughen, 2017] :

- Conception ou construction inadéquate: Bien qu'un réservoir atmosphérique ne doit pas supporter des pressions élevées, il doit résister à la pression hydrostatique du liquide stocké. Les effondrements peuvent survenir lorsque le matériau de construction est insuffisamment résistant, comme observé dans le cas de l'inondation de mélasse à Boston où les parois étaient trop fines [Souguir, 2018]. De plus, les soudures défectueuses sont souvent responsables ; un rapport du Chemical Safety Board indique que plus de 90% des incidents connus sont dus à ces défauts;
- Conversion à un nouveau service: Les réservoirs sont conçus pour un service spécifique. Par exemple, passer d'hydrocarbures à de l'eau augmente la pression hydrostatique sur un réservoir de 25%. Une telle conversion peut dépasser la capacité du réservoir et entraîner une rupture;
- Détérioration avec le temps: Les réservoirs atmosphériques se détériorent avec le temps en raison de la corrosion et de l'érosion, ce qui peut entraîner un amincissement des parois. Un amincissement localisé dû à des

jets ou des conduites peut créer des points faibles propices aux défaillances catastrophiques;

- Dans certaines situations rares, un bac de stockage peut subir une défaillance catastrophique due à des défauts mécaniques ou métallurgiques, ou encore être surpressurisé par un trop-plein ou un remplissage rapide;

Autres facteurs contribuant aux effondrements:

- Les événements d'impact pouvant provoquer une perte de confinement incluent l'impact d'objets transportés, tels que des véhicules ou des aéronefs, ainsi que des projectiles issus d'explosions;
- Des événements naturels tels que vents violents, tempêtes, inondations, tsunamis et tremblements de terre peuvent également causer une perte de confinement dans les réservoirs atmosphériques.

(b) Implosion du réservoir :

Les implosions de réservoirs atmosphériques constituent un risque significatif pour la sécurité, en raison de leur incapacité à supporter des conditions de vide. Ces événements peuvent survenir de manière soudaine et catastrophique, souvent en raison de changements brusques de température ou d'erreurs humaines lors des opérations de nettoyage ou de maintenance. Contrairement aux explosions, les implosions ne génèrent pas d'ondes de choc ni de débris volants. Bien que des brèches puissent se produire aux plis formés, la perte de confinement est généralement peu significative. Le principal risque associé aux implosions réside dans le potentiel de blessures pour le personnel se trouvant à proximité. Les réservoirs atmosphériques implosent lorsqu'ils subissent une pression interne inférieure à celle qu'ils peuvent supporter, c'est-à-dire un vide. Les sources de vide incluent [Schmidt, 2017] :

- Vide délibéré : Créé par des pompes à vide et des jets de vapeur;
- Vide accidentel : Généré par l'aspiration des pompes lors du pompage;
- Drainage gravitaire : Même en l'absence de pompe, le drainage gravitaire pour vider un réservoir peut créer un vide.
- Changements de phase : En particulier, la condensation des vapeurs peut également engendrer un vide.
- Erreurs humaines: lors des opérations de nettoyage ou de maintenance sont souvent à l'origine d'implosions. Par exemple, une mauvaise gestion des vannes peut entraîner un déséquilibre de pression.
- Changements thermiques: Des changements brusques de température peuvent provoquer une contraction rapide des gaz à l'intérieur du réservoir, entraînant une pression interne insuffisante.

(c) Explosion/ Incendie :

La plupart des explosions de réservoirs atmosphériques concernent le stockage de liquides inflammables, où l'explosion du matériau inflammable constitue la principale préoccupation. Il existe également des explosions physiques qui peuvent se produire, résultant d'une surpression dans le réservoir pour des raisons autres que la combustion soudaine. Les réservoirs atmosphériques explosent

lorsqu'ils subissent une pression interne supérieure à celle qu'ils peuvent supporter. Les sources de cette pression élevée incluent la pression des lignes d'entrée dans le réservoir et le chauffage à l'intérieur de celui-ci.

La pression dans la ligne d'entrée peut provenir soit de gaz, soit de liquides. Lorsque le réservoir est ouvert à l'atmosphère, la chute de pression à l'entrée est complète, et la pression dans l'entrée n'est pas transférée à l'intérieur du réservoir. Cependant, lorsque le réservoir est isolé de l'atmosphère, la pression à l'intérieur tend à se rapprocher de celle de la ligne d'entrée. Les gaz s'écouleront dans le réservoir jusqu'à ce que la pression interne corresponde à la pression d'alimentation. Les liquides entreront également dans le réservoir, comprimant l'espace de tête, jusqu'à ce que la pression de cet espace corresponde à la pression de repos de la ligne de liquide.

Le chauffage d'un réservoir peut résulter d'un chauffage externe ou d'une réaction exothermique, prévue ou imprévue, à l'intérieur du réservoir. Dans les deux cas, le liquide se dilate et la pression de vapeur augmente. L'expansion du liquide n'est préoccupante que lorsque le réservoir est isolé de l'atmosphère et complètement rempli. Dans ce cas, étant donné que les liquides sont des fluides incompressibles, toute expansion supplémentaire augmentera considérablement la pression. Toutefois, les réservoirs atmosphériques ne sont pas totalement rigides, ce qui entraîne un renflement plutôt qu'une rupture.

Une fuite peut également survenir à la suite d'une explosion dans le bac de stockage. Plusieurs mécanismes peuvent expliquer cela :

- La surpression physique qui provoque l'éclatement du réservoir ou de la cuve ;
- L'ignition d'un mélange inflammable ;
- L'évolution de gaz due à la réaction d'une impureté ou du matériau de construction ;
- Une réaction incontrôlée à l'intérieur du réservoir

Un incendie affectant un bac de stockage peut entraîner sa défaillance, pouvant provenir d'en dessous ou être causé par une flamme projetée sur celui-ci. L'incendie criminel ou le sabotage sont d'autres causes possibles. Le sabotage peut prendre la forme d'interférences avec l'installation ou d'initiations directes par impact, feu ou explosion [Schmidt, 2017].

(d) Fuites accidentels :

Les fuites dans les installations de stockage d'hydrocarbures surviennent fréquemment à partir d'équipements, de tuyauteries ou de raccords. Parmi les équipements les plus susceptibles de fuir figurent, en particulier, les pompes. Les fuites au niveau des tuyauteries peuvent être causées par une fissure, un trou d'épingle, une rupture complète, ou encore une défaillance au niveau d'un joint, d'un joint torique ou d'une vanne.

Certaines activités opérationnelles peuvent également entraîner des fuites ou des ruptures des réservoirs de stockage. Le trop-plein constitue un risque important, pouvant provoquer une fuite directe ou, dans certains cas, une rupture du bac. D'autres événements opérationnels, tels que les opérations de vidange et d'échantillonnage, peuvent également être à l'origine de fuites. Enfin, les

activités de maintenance présentent un risque, généralement en raison de l'introduction involontaire de fluide dans une section qui n'est pas complètement isolée..

De manière générale, les principaux événements dangereux et certains événements initiateurs sont présentés dans le Tableau 1.1.

A. Événements dangereux			
Matériaux	État	Stockage	Événements dangereux
Inflammable	Liquide	Atmo-sphérique	Fuite de liquide, puis incendie de cuvette ou de réservoir. Explosion du réservoir, puis incendie de cuvette ou de réservoir.
	Gaz liquéfié	Pression	Dégagement instantané de liquide – nuage de vapeur inflammable, nappe de liquide, puis incendie de nappe. Incendie de liquide en écoulement, flamme de jet, incendie de nuage de vapeur. Explosion de nuage de vapeur, réservoir en feu, puis flamme de jet, BLEVE.
	Gaz liquéfié	Réfrigéré	Dégagement instantané de liquide – nuage de vapeur inflammable, nappe de liquide, puis incendie de cuvette ou de réservoir. Incendie de liquide en écoulement, incendie de nuage de vapeur. Explosion de nuage de vapeur, réservoir en feu, puis incendie de cuvette ou de réservoir, incendie de liquide en écoulement.
Toxique	Liquide	Atmo-sphérique	Fuite de liquide, puis nuage de gaz toxique. Explosion du réservoir, puis nuage de gaz toxique.
	Gaz liquéfié	Pression	Dégagement instantané de liquide – nuage de vapeur inflammable, nuage toxique. Explosion du réservoir, puis réservoir en feu, BLEVE.
	Gaz liquéfié	Réfrigéré	Nuage toxique. Dégagement instantané de liquide – nuage de vapeur inflammable, nappe de liquide, puis nuage toxique. Réservoir en feu, puis nuage toxique.
B. Événements initiateurs			
Rupture catastrophique du réservoir ou du récipient. Défaillance ou fuite d'un autre équipement, d'une tuyauterie ou d'un raccord. Explosion dans un réservoir ou un récipient. Incendie englobant un réservoir ou un récipient. Flamme de jet jouant sur un réservoir ou un récipient. Remplissage excessif du réservoir ou du récipient. Rejet causé par des opérations. Rejet causé par la maintenance. Événement naturel. Incendie criminel, sabotage.			

Tableau 1.1

Quelques événements dangereux principaux et événements initiateurs pour les réservoirs de stockage

4.3.2 Phénomène dangereux

(a) BLEVE et éventuelle boule de feu

Le BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion) c'est une vaporisation explosive d'un liquide porté à ébullition qui se produit lorsqu'un réservoir contenant un liquide fortement surchauffé au-dessus de son point d'ébullition atmosphérique normal se rompt de manière catastrophique. Le BLEVE concerne le stockage de gaz liquéfiés sous pression ou de liquides pressurisés. La première conséquence d'un BLEVE est un effet de souffle dû, d'une part, à la dilatation de la vapeur lors de la rupture du réservoir et, d'autre part, à la vaporisation explosive du contenu liquide du réservoir. Cet effet est généralement suivi de l'éjection de projectiles. Si la substance est inflammable, l'aérosol air-substance peut s'enflammer immédiatement. Le front de flamme s'éloigne rapidement du point d'inflammation et une boule de feu se produit. Sa température est extrêmement élevée et elle provoque un rayonnement thermique important [Abbasi and Abbasi, 2007].

(b) BOIL OVER

Généralement consécutif à un incendie de réservoir, le phénomène de débordement (ou Boil Over) est l'éruption soudaine et violente de liquide en combustion hors d'un réservoir de stockage atmosphérique en feu. Il résulte de la transformation en vapeur de l'eau liquide contenue au fond du réservoir. Un stockage atmosphérique peut conduire à un débordement si les conditions suivantes sont réunies : [Patej, 2003]

- Présence d'eau au fond du réservoir.
- Formation d'une onde de chaleur qui rencontre la couche d'eau sous la masse d'hydrocarbures.
- Hydrocarbure suffisamment visqueux pour que la vapeur d'eau ne puisse pas le traverser facilement depuis le fond du réservoir.
- Température d'ébullition moyenne supérieure à celle de l'eau à la pression de l'interface eau/hydrocarbure.
- Une plage de température d'ébullition suffisamment large pour générer une onde de chaleur, c'est-à-dire 60 °C au-delà de la température d'ébullition de l'eau à la pression de l'interface.

(c) VCE/ Flashfire

Lorsqu'une fuite se produit sur un équipement, un dégagement gazeux peut survenir, soit directement, soit à la suite de la vaporisation progressive d'une flaque au sol à proximité de la fuite. Cela conduit à la formation d'un nuage qui dérive et se disperse avec le vent. Si la substance est inflammable, il existe une zone intermédiaire dans laquelle les concentrations de vapeur dans l'air se situent entre les limites d'inflammabilité de la substance. Une source d'inflammation suffisamment énergétique, située sur la trajectoire de la zone inflammable du nuage, peut enflammer ce nuage. Selon la vitesse du front de flamme, l'accident conduira à une inflammation éclair ou à une explosion de nuage de vapeur (VCE, Vapour Cloud Explosion). Ce dernier accident provoque une onde de surpression-dépression. L'effet dévastateur est associé à la surpression maximale ainsi qu'à la forme de l'onde [Atkinson et al., 2017].

(d) UVCE (Unconfined Vapor Cloud Explosion)

Un nuage inflammable non confiné de gaz ou de vapeurs d'hydrocarbures peut se former suite à l'évaporation d'un liquide, notamment lors d'un déversement d'hydrocarbures. Sa dispersion dépend des conditions atmosphériques locales. Si les vapeurs sont plus lourdes que l'air, le nuage restera au ras du sol, formant une nappe de faible hauteur. Lorsqu'il entre en contact avec une source d'inflammation, la flamme se propage à l'intérieur du nuage. Pour qu'un UVCE (Unconfined Vapor Cloud Explosion) se produise, plusieurs conditions doivent être réunies simultanément. Tout d'abord, un combustible tel qu'un gaz ou des vapeurs d'hydrocarbures doit être présent, ainsi qu'un comburant, généralement l'oxygène de l'air. Ensuite, ces éléments doivent être intimement mélangés pour former un nuage inflammable, dont la concentration se situe dans le domaine d'explosivité. Enfin, ce mélange inflammable doit entrer en contact avec une source d'inflammation efficace, c'est-à-dire une source d'énergie suffisamment puissante pour amorcer la flamme et déclencher l'explosion. Si toutes ces conditions sont réunies, la combustion rapide du nuage entraîne une forte augmentation de pression, générant une onde de choc destructrice [Langree et al., 2020].

(e) Feu de nappe (Poolfire)

La combustion de matière s'évaporant d'une couche de liquide (une nappe). La présence de cette couche de liquide résulte de la défaillance d'un équipement contenant un liquide inflammable [Chen et al., 2023].

(f) Feu torche (Jetfire)

La manipulation de liquides ou de gaz inflammables sous pression peut entraîner un jet enflammé en cas de fuite sur une conduite ou un réservoir. L'inflammation du fluide conduit à la formation d'une flamme de jet, caractérisée par une énergie radiante élevée (nettement supérieure au rayonnement d'un feu de nappe) et par une énergie cinétique notable. Un jet enflammé (également appelé jet-fire ou feu torche) se définit comme une flamme de diffusion turbulente établie, résultant de la combustion d'un composé relâché continuellement dans une direction privilégiée avec une vitesse initiale significative [Lowesmith et al., 2007].

5 Impacts environnementaux

L'industrie pétrochimique, pilier de la production de biens de consommation courante, se trouve au cœur d'un paradoxe : son rôle essentiel s'oppose aux défis environnementaux majeurs qu'elle engendre. Cette industrie est responsable d'une pollution multiforme, affectant l'air, l'eau et les sols, tout en contribuant significativement aux émissions de gaz à effet de serre comme montré dans le tableau 1.2. Les usines pétrochimiques émettent des composés organiques volatils (COV) et d'autres polluants atmosphériques, compromettant la qualité de l'air et la santé des populations. Parallèlement, les déversements accidentels et les rejets intentionnels d'hydrocarbures contaminent les écosystèmes aquatiques, menaçant la biodiversité et les ressources en eau potable. Cette pollution, issue de l'introduction de substances nocives dans l'environnement, suscite une préoccupation croissante quant à ses effets sur la santé humaine, l'écosystème atmosphérique et les ressources naturelles. Les sources de cette pollution atmosphérique incluent des gaz tels que le monoxyde de carbone, le dioxyde de soufre, le sulfure d'hydrogène et le

méthane, tandis que les fractions aliphatiques et les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) s'évaporent facilement lors du raffinage [Jeandel et al., 2013].

Les déversements accidentels qui en résultent des accidents de stockage des hydrocarbures compliquent l'identification des résidus de pétrole déversé et exacerbent les impacts biologiques. En effet, les coûts économiques de cette pollution se traduisent par des maladies, des dépenses de santé et une perte de productivité, soulignant l'impératif d'une gestion environnementale rigoureuse et d'une coordination accrue pour préserver les ressources pour les générations futures. Face à ces enjeux, l'industrie est soumise à des normes environnementales de plus en plus strictes, l'obligeant à repenser ses méthodes d'extraction, de production et de distribution [Jeandel et al., 2013].

Polluants Hydrocarburés	Sources	Effets sur la Santé et l'Environnement
Diesel	Fabrication de biodiesel, moteurs diesel industriels, industrie pétrolière, démantèlement de navires.	Pollution environnementale (sol, eau et air), effets toxiques, cancérigènes et mutagènes pour les organismes vivants, perte de biodiversité.
HAPs (Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques)	Fabrication de colorants, plastiques, pesticides et transformation de certains aliments.	Diminution de la fonction immunitaire, cataractes, atteintes rénales et hépatiques.
Pétrole brut	Production de pétrole.	Dommages à tous les systèmes d'organes humains, mortalité de la végétation, sols infertiles, inhibition de la photosynthèse chez les plantes aquatiques.
Essence	Industrie des moteurs de véhicules, fabrication d'appareils fonctionnant au gaz de pétrole.	Pollution de l'air, irritation de la peau et de la gorge, cancer du poumon, bronchite.
TPH (Hydrocarbures Totaux de Pétrole)	Industrie pétrolière, fabrication de biodiesel.	Atteintes du système nerveux central, fatigue, maux de tête, nausées, somnolence, irritation de la peau et des yeux.

Tableau 1.2 | Sources de pollution par les hydrocarbures et leurs effets [Imron et al., 2020]

5.1 Pollution des sols et des eaux

Le tableau 1.3 présente une série d'accidents liés à des défaillances de murs de rétention (cuvettes de rétention) dans différentes installations industrielles. Plusieurs scénarios accidentels peuvent être identifiés, mettant en péril l'intégrité des installations et l'environnement. Tout d'abord, un vidange rapide du réservoir peut générer une onde d'impact dont l'intensité est suffisante pour dépasser partiellement le bord du réservoir de rétention, compromettant ainsi son efficacité. De plus, l'effondrement d'un réservoir entraîne la dispersion de ses débris, susceptibles d'endommager la structure du réservoir de rétention. Dans ce cas, le liquide contenu dans le réservoir se déverse initialement dans le bac de rétention, avant de s'échapper dans l'environnement à travers la partie endommagée. Un scénario encore plus critique survient en cas d'effondrement total du réservoir ou d'apparition d'une fissure majeure. Une telle défaillance conduit à une vidange rapide du réservoir, générant une onde d'impact qui peut gravement endommager le bac de rétention. Dès lors, le liquide s'échappe directement dans l'environnement à travers la structure fragilisée. Par ailleurs, l'ouverture des vannes de drainage constitue un autre facteur de risque majeur. Une telle anomalie favorise une fuite du liquide stocké, qui

s'évacue alors par les vannes ouvertes et se répand dans l'environnement. De même, une fuite de liquide inflammable peut entraîner une inflammation du produit, générant un rayonnement thermique suffisamment intense pour détériorer la structure, ou une partie de la structure, du bac de rétention. Cette dégradation favorise ainsi la dispersion du liquide dans l'environnement. En outre, des défauts structurels ou de conception peuvent également compromettre l'efficacité des bacs de rétention. Un traitement de surface inadéquat du fond du réservoir de rétention peut permettre l'infiltration progressive du liquide dans le sol, aggravant ainsi le risque de contamination. Enfin, un volume insuffisant du bac de rétention constitue une faille critique. Lorsque la capacité de rétention est dépassée en cas de fuite, le liquide s'accumule jusqu'à atteindre le bord supérieur du réservoir de rétention, provoquant un débordement et une dispersion incontrôlée dans l'environnement [Trávníček et al., 2021].

Année	Pays	Substance stockée	Matériau du mur
2009	USA, Porto Rico	Pétrole brut	-
2009	UK	Solvant de déchets	Mur en béton
2008	USA, Virginie	Engrais	Mur de terre autour du réservoir
2007	France	Pétrole brut	Digue en terre
2005	UK	Fioul lourd	Mur en béton
2005	UK	Kérosène	Mur en béton
2005	Suède	Acide sulfurique	Mur en béton rectangulaire, 0,6 m de haut, volume $\sim 3100 \text{ m}^3$
2005	Belgique	Pétrole brut	Digue en terre
2002	UK	Para-toluidine	-
2001	UK	Solution de cyanure de sodium	Le mur a contenu latéralement, mais sans sol imperméable
1988	USA, Pennsylvanie	Fioul diesel	Digue en terre
1987	France	Hydrocarbures	Mur de 2,2 m (probablement en béton)
1974	Japon	Fioul lourd	Mur (probablement en béton), 8 m du réservoir, 37 m du centre

Tableau 1.3 | Exemples d'accidents où la cuvette de rétention a défailli

La conséquence primordiale de ces défaillances réside dans la contamination environnementale. Les données du tableau 1.4 attestent de dommages environnementaux majeurs dans quatre incidents. Les écosystèmes aquatiques ont été particulièrement touchés, avec des perturbations significatives observées dans des rivières, des cours d'eau, des zones maritimes ou des zones humides dans sept cas distincts. Par ailleurs, une contamination des sols a été identifiée. L'accident de Buncefield, quant à lui, mis en évidence le risque de dégradation des sources d'eau potable, entraînant une interruption de l'approvisionnement en eau pour les populations situées dans un rayon de 3 km autour du site [Nicholas and Whitfieldb, 2013].

Les répercussions financières associées à ces accidents peuvent s'avérer considérables, atteignant fréquemment plusieurs millions d'euros. Ces pertes financières sont principalement attribuables aux coûts induits par les opérations de dépollution, incluant la restauration des écosystèmes et la décontamination des sols. À titre d'illustration selon [Trávníček et al., 2021], l'accident de Buncefield, par exemple, a conduit à une amende de 600 000 GBP pour pollution de l'eau, entre autres infractions. Des coûts supplémentaires peuvent également résulter d'une surveillance environnementale continue, de l'indemnisation des populations affectées et de

Année	Pays	Blessés / Décès	Autres conséquences	Pertes financières
2013	USA	6 / 1	Contamination du sol par des hydrocarbures (1557 m ²)	145 000 EUR
2009	USA	43 / 0	Environ 30 millions de gallons de pétrole déversés. Pollution des masses d'eau superficielles, des zones humides voisines et de la baie de San Juan.	Plus de 8,2 millions USD pour responsabilité environnementale
2008	USA	2 / 0	200 000 gallons d'engrais liquide déversés. Le liquide s'est répandu dans les environs, une partie a atteint la rivière.	N/A
2007	France	0 / 0	2000 m ² de pétrole déversés sur des remblais de terre et des installations spécifiques. 50 m ³ ont atteint une rivière via un réseau d'eau pluviale.	Estimé à plus de 50 millions EUR (principalement pertes d'exploitation).

Tableau 1.4 | Conséquences des accidents des industries pétrolières

la restauration des infrastructures endommagées. Au-delà de l'impact économique immédiat, Ce type de défaillances sont susceptibles de nuire gravement à la réputation de l'exploitant, engendrant des conséquences financières et opérationnelles à long terme.

5.2 Émissions atmosphériques

Il existe de multiples sources d'émissions de polluants atmosphériques au sein des industries du raffinage du pétrole et de la pétrochimie. Les principales catégories de procédés des raffineries et d'opérations associées peuvent être divisées en cinq : procédés de séparation, procédés de conversion du pétrole, procédés de traitement du pétrole, manutention des matières premières et des produits, et installations auxiliaires. Dans ce cadre, les sources d'émissions peuvent être davantage catégorisées en émissions de procédés, émissions de combustion, émissions fugitives, émissions de stockage et de manutention des produits, et émissions auxiliaires [Ragothaman and Anderson, 2017] . Ces sources sont illustrées de manière simplifiée dans la Figure 1.1.

Chacune de ces sources contribue à des degrés divers des polluants rejetés dans l'atmosphère, les émissions de combustion étant généralement la source la plus importante, suivies par les émissions de procédés et les émissions fugitives. Les sources de combustion contribuent à la plus grande part des principaux polluants atmosphériques réglementés, tels que les émissions de Composés d'azote et d'oxygène (NOx), de monoxyde de carbone (CO) et de particules fines (PM), tandis que les émissions de procédés et les émissions fugitives prédominent en termes de rejets de composés organiques volatils (VOC). Cependant, les contributions exactes varient considérablement en fonction de facteurs spécifiques à chaque raffinerie [Tavella et al., 2025].

Les principaux polluants atmosphériques émis par les industries pétrolières sont les composés organiques volatils (COV) ; cependant, des quantités importantes d'oxydes de soufre (principalement le dioxyde de soufre - SO₂), d'oxydes d'azote (principalement le dioxyde d'azote - NO₂), de particules (fines et grossières - PM_{2.5} et PM₁₀), d'ozone (O₃), de monoxyde de carbone (CO), de sulfure d'hydrogène (H₂S), de cyanure d'hydrogène (HCN) et de métaux traces (principalement le plomb - Pb) sont également rejetées, principalement par le biais des émissions de procédés et de combustion [Tavella et al., 2025].

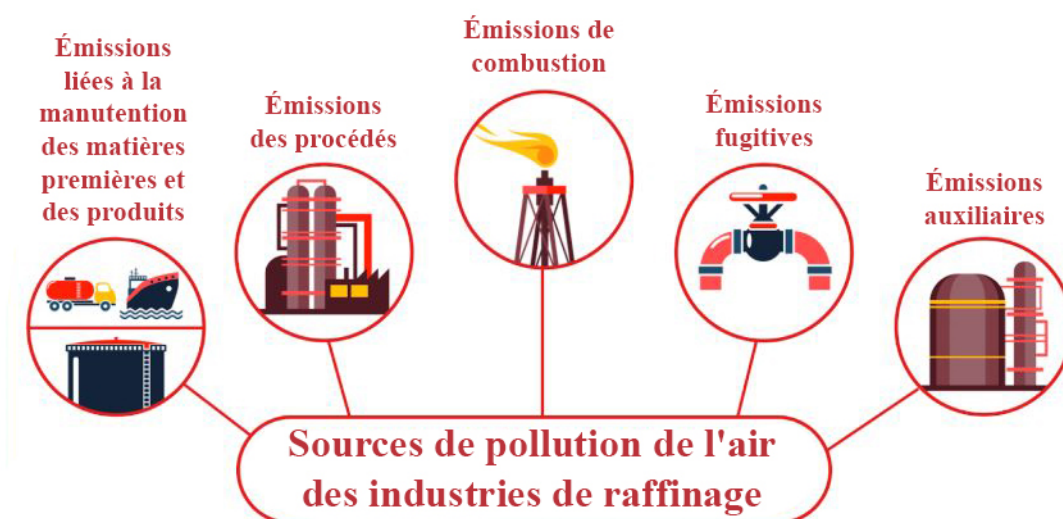


Figure 1.1 | Sources d'émissions des produits pétroliers

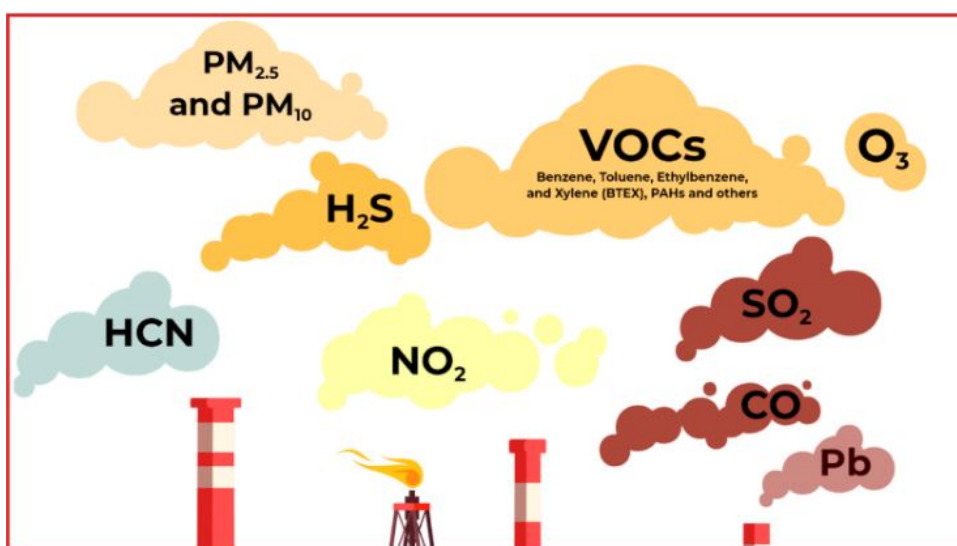


Figure 1.2 | Principaux polluants atmosphériques émis par les industries du raffinage du pétrole et de la pétrochimie

6 Études de cas sur des incidents passés

6.1 Analyse statistique des accidents dans le secteur des hydrocarbures

Les incidents impliquant des réservoirs atmosphériques représentent une préoccupation majeure en matière de sécurité industrielle, en raison de la présence fréquente de grandes quantités de produits chimiques inflammables et/ou dangereux. Bien que la fréquence des accidents liés à ces réservoirs soit relativement faible, estimée à 15×10^{-5} par réservoir et par an pour ceux opérant à température et pression ambiantes, les conséquences potentielles peuvent être catastrophiques.

En effet, ces incidents peuvent entraîner des pertes en vies humaines, un impact environnemental significatif et des pertes économiques considérables. Dans une étude menée par Thyer et al. (2009), il a été rapporté qu'entre 1919 et 2004, un total de 64 défaillances de réservoirs de stockage a été enregistré. De plus, cette recherche a également mis en lumière 15 cas de défaillances multiples de réservoirs de stockage survenus durant la même période [Thyer et al., 2009].

La recherche menée par [Collins and Keeley, 2003] a révélé qu'entre 1991 et 2002, un total de 718 accidents de perte de confinement a été enregistré au Royaume-Uni. Parmi ces incidents, 22 étaient spécifiquement liés à la perte d'intégrité de la coque des réservoirs. Les causes les plus fréquemment citées pour ces accidents incluent la corrosion, la fatigue des matériaux et le stress exercé sur les structures.

Une étude réalisée par Chang et Lin (2006) a porté sur l'analyse de 242 accidents (Amérique du Nord, Asie et en Europe) survenus entre 1960 et 2003 dans des réservoirs de stockage, qu'ils soient atmosphériques ou pressurisés, contenant du pétrole ou des produits chimiques. Cette recherche a révélé que les incendies étaient plus fréquents dans les réservoirs à toit flottant ouverts par rapport à ceux à toit fixe. Les résultats ont également mis en lumière que la majorité des incidents se produisaient dans les raffineries de pétrole, où 116 cas ont été signalés, représentant environ 47,9% du total des accidents étudiés. Parmi ces événements, 60% étaient des incendies, tandis que 25% étaient des explosions, principalement causées par des nuages de vapeur non confinés, des ruptures de réservoirs sous pression et des explosions de réservoirs. L'étude indique également que 17 accidents sur 242 étaient liés à une fissure ou une rupture du réservoir. Les auteurs précisent également que parmi ce total, 13 accidents étaient dus à des fissures du réservoir et 2 accidents à des ruptures du corps [Chang and Lin, 2006].

En outre, les terminaux d'import/export figuraient comme la deuxième catégorie la plus touchée, avec un total de 64 cas, soit 26% de l'ensemble des incidents. Les installations pétrochimiques ont également été impliquées dans environ 25% des accidents. Les produits les plus couramment stockés dans ces réservoirs incluent le pétrole brut ainsi que ses dérivés tels que l'essence, le fioul et le gazole. Selon l'étude de [Fan, 2005], les trois principales causes des accidents sont la foudre (32%), les opérations de maintenance (13%) et les erreurs opérationnelles (12%). D'autres causes incluent la défaillance d'équipement (8%), le sabotage (8%), les fissures et ruptures (généralement au fond du réservoir ou au niveau des soudures), (7%), les fuites et ruptures de conduites (6%), l'électricité statique (5%), les flammes nues (4%), les catastrophes naturelles (3%) et les réactions incontrôlées (2%).

Une étude approfondie menée par Bin Zheng en 2011 propose une analyse détaillée des incendies impliquant des réservoirs de stockage, en examinant leurs causes, leurs conséquences et les mesures préventives nécessaires. Les incendies de réservoirs de stockage, souvent accompagnés d'explosions, engendrent des pertes considérables. L'étude porte sur cinquante incidents survenus en Chine au cours des 50 dernières années. Il en ressort que plus de 64% de ces accidents ont eu lieu dans des installations pétrochimiques, des raffineries et des dépôts de carburant. Par ailleurs, 82% des incendies recensés ont été suivis d'explosions. Ces sinistres se produisent majoritairement lors d'opérations de maintenance, de réparation, ou encore au cours des phases de chargement et de déchargement. Environ 27% des accidents sont imputables à des erreurs humaines, notamment dans le cadre des opérations et des activités de maintenance. L'étude met en lumière les principales défaillances opérationnelles, de maintenance et de gestion ayant conduit à ces accidents liés aux réservoirs de stockage [Zheng and Chen, 2011].

Une autre étude menée par Persson et Lonnermark a identifié 480 incendies dans des réservoirs

voirs de stockage à travers le monde entre 1951 et 2003. Le nombre d'incendies de réservoirs rapportés par les médias internationaux se situe entre 15 et 20 chaque année. Parmi les incidents totaux signalés dans les médias, environ un tiers (31%) a été attribué à la foudre dans des réservoirs à toit flottant externe [Taveau, 2011].

Dans l'enquête sur les incidents LASTFIRE, parrainée par 16 entreprises de l'industrie pétrolière en 2012, il a été rapporté que 52 des 62 événements d'incendie initiaux inclus dans l'enquête étaient des incendies de joint d'étanchéité provoqués par la foudre dans des réservoirs à toit flottant externe. Une autre étude réalisée par le projet LASTFIRE en 1997 a révélé que les incendies de joints d'étanchéité dans les réservoirs à toit flottant externe constituent les scénarios les plus courants [Moshashaei et al., 2018].

Dans une revue des incidents de réservoirs effectuée par Thyer en 2009, 64 incendies de réservoirs isolés ont été identifiés entre 1919 et 2004, dont les causes ont été attribuées à divers facteurs, la plupart étant liés à l'affaissement du toit flottant dans le réservoir à toit flottant.

L'API (American Petroleum Institute) a collecté 22 accidents d'incendie de surface totale parmi les 81 accidents d'incendie de réservoirs à toit flottant à grande échelle survenus entre 1951 et 1995, ce qui représente 27%, et le diamètre de ces réservoirs collectés variait entre 30,5 m et 100 m [Thyer et al., 2009].

Une description détaillée de l'accident d'effondrement du réservoir est également référencée dans [Schmidt, 2017].

6.2 Accidents majeurs dans les installations de stockage : Retours d'expérience

(a) Accident de Buncefield, Hertfordshire, Royaume-Uni. 11 décembre 2005:

L'accident de Buncefield, survenu le 11 décembre 2005, est l'un des incidents industriels les plus marquants de l'histoire récente au Royaume-Uni. Selon le rapport final du Buncefield Major Incident Investigation Board (2005), une série d'explosions a secoué le dépôt pétrolier de Buncefield, situé à Hemel Hempstead, dans le Hertfordshire suite au débordement d'un réservoir à un taux estimé de $550 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ pendant plusieurs heures dans le bassin de rétention et générant d'énormes quantités de vapeur. Cela s'est produit en raison d'une défaillance des instruments de mesures, les jauges de niveau élevées n'ayant pas indiqué que le réservoir était plein. Une explosion s'est produite, suivie d'un important incendie qui a englouti 23 grands réservoirs de stockage de carburant sur une grande partie du site de Buncefield, comme on peut le voir sur la Figure 1.3.

Les explosions ont été si puissantes qu'elles ont été ressenties jusqu'à 160 km du site, atteignant une magnitude de 2,4 sur l'échelle de Richter. Il n'y a eu aucun décès mais quarante-trois personnes ont été blessées lors de l'accident. Cependant, des dommages significatifs ont été causés aux propriétés commerciales et résidentielles à proximité du site de Buncefield, et environ 2 000 personnes ont dû être évacuées de leurs domiciles. L'incendie a duré cinq jours, détruisant la majeure partie du site et émettant un large panache de fumée dans l'atmosphère, qui s'est dispersé sur le sud de l'Angleterre et au-delà. L'estimation des coûts totaux quantifiables résultant de l'accident de Buncefield s'élevait à près d'un milliard de livres sterling, incluant les pertes matérielles et les interruptions d'activité pour les entreprises environnantes.



Figure 1.3 | Accident de Buncefield, Hertfordshire, Royaume-Uni

L'accident de Buncefield, ait entraîné des conséquences environnementales notables, notamment en termes de pollution de l'air et de contamination potentielle des eaux et des sols. L'incendie a généré un immense panache de fumée noire qui s'est répandu sur le sud-est de l'Angleterre et au-delà, atteignant même des régions en France. En outre, la contamination des eaux a constitué une préoccupation majeure. Environ 16 000 m³ d'eaux d'extinction ont été récupérés après l'incendie, mais une partie a été accidentellement rejetée dans une station d'épuration, puis dans la rivière Colne. Ce déversement soulève des inquiétudes quant à la contamination potentielle des ressources en eau. L'impact sur les sols a également été significatif. Le déversement d'hydrocarbures a entraîné la formation d'un aérosol et d'une nappe de liquide sur le sol. Concernant la biodiversité, bien que l'accident ait causé des dommages matériels importants, les études ont montré que l'impact direct sur la biodiversité locale était limité. Cependant, la pollution atmosphérique et les déversements d'hydrocarbures peuvent avoir des effets à long terme sur les écosystèmes environnants [Board, 2005].

(b) Accident à la raffinerie de Singapour, Pulau Merlimau, octobre 1988

L'incendie de réservoir survenu à Singapour en octobre 1988 représente un cas d'étude emblématique des risques associés au stockage de substances inflammables. Cet incident a été déclenché après deux jours de fortes pluies, lorsque un réservoir de naphte à toit flottant d'une capacité de 19 000 m³, a subi une défaillance critique. Les relevés de jauge du réservoir ont montré une élévation continue du niveau du naphte, atteignant une moyenne de 0,3 m, avec un pic à 0,49 m la veille de l'accident.

Malheureusement, cette augmentation a été négligée.

Le jour de l'incident, une chute significative du niveau du réservoir a été observée. Lors d'une inspection visuelle, il a été constaté que le toit flottant s'était submergé, laissant seulement quelques sections au niveau du pôle anti-rotation émerger au-dessus du liquide. En réponse à cette situation critique, de la mousse a été appliquée pour couvrir le naphte exposé. Cependant, quelques minutes plus tard, la surface s'est enflammée, déclenchant un incendie dévastateur.

L'analyse des causes suggère qu'une défaillance mécanique du support du pôle anti-rotation a généré des étincelles par friction, initiant ainsi l'incendie. Au fil des heures, le feu s'est propagé à deux autres réservoirs identiques partageant une zone de bassin commune avec le réservoir en feu. Finalement, après deux jours d'intenses efforts de lutte contre l'incendie, la situation a commencé à être maîtrisée. Tous les réservoirs concernés ont été totalement détruits, tandis que les installations environnantes ont subi des dommages thermiques mineurs [Shafiq et al., 2021].



Figure 1.4 | Accident de Pulau Merlimau, Singapour

(c) L'accident à Deer Park, Texas, mars 2019

Le dimanche 17 mars 2019, vers 10 heures du matin, un réservoir contenant du naphte a pris feu dans l'installation de l'Intercontinental Terminals Company (ITC) à Deer Park, au Texas, un site de stockage de liquides et de gaz pétroliers en activité depuis 1972. L'incendie s'est rapidement propagé à 14 autres réservoirs au cours des six jours suivants, générant un panache noir chargé de gaz toxiques, y compris du benzène et des particules en suspension, qui a atteint d'autres communautés environnantes.

Le coût total des dommages matériels causés par cet incendie a été estimé à plus de 150 millions de dollars. Quinze réservoirs de stockage atmosphériques d'une capacité de 80 000 barils ont été détruits ainsi que leur contenu, entraînant des pertes économiques significatives pour l'ITC et des perturbations dans les opérations de stockage de produits pétroliers. L'incendie a également eu un impact environnemental majeur, notamment en raison d'une rupture du mur de confinement qui a permis le déversement d'environ 470 000 à 523 000 barils de produits dans les voies navigables adjacentes. Ces substances ont atteint le Houston Ship Channel, entraînant la fermeture d'une portion de sept milles du canal maritime ainsi que plusieurs parcs riverains en raison de la contamination. Dans les cinq jours suivant l'incendie, des écoles ont été fermées et plusieurs ordres de refuge sur place ont été émis pour Deer Park et les communautés voisines, suscitant des inquiétudes concernant les impacts sur la santé environnementale liés à l'incendie. L'une des préoccupations majeures était le risque accru d'exposition à la pollution de l'air extérieur, y compris aux particules en suspension et aux composés organiques volatils (COV) tels que le benzène, le toluène, l'éthylbenzène et les xylènes générés par l'incendie [An Han et al., 2020].



Figure 1.5 | Accident de Deer Park, Texas

- (d) l'accident de la Caribbean Petroleum Corporation (CAPECO), Bayamón, Porto Rico, octobre 2009

Dans la nuit du 23 octobre 2009, une importante explosion s'est produite dans l'installation de la Caribbean Petroleum Corporation (CAPECO) à Bayamón, Porto Rico, lors du déchargement de l'essence d'un pétrolier, le Cape Bruny, vers le parc de réservoirs CAPECO à terre. Un réservoir de stockage aérien de 5 millions de gallons a débordé dans un bassin de confinement secondaire. Le spray d'essence s'est vaporisé, formant un vaste nuage de vapeur qui s'est enflammé après avoir atteint une source d'ignition dans la zone de traitement des eaux usées de l'installation. L'explo-

sion et le feu résultant de plusieurs explosions secondaires ont causé des dommages significatifs à 17 des 48 réservoirs de stockage de pétrole et à d'autres équipements sur place, ainsi que dans les quartiers et les entreprises environnantes. Les incendies ont duré près de 60 heures. Des produits pétroliers se sont infiltrés dans le sol, les zones humides voisines et les voies navigables navigables dans la région environnante. L'accident a eu des conséquences environnementales considérables. Environ 30 millions de gallons de pétrole ont été libérés dans les masses d'eau et les zones humides voisines, entraînant une contamination grave des sols et des écosystèmes aquatiques. Cette pollution a eu des effets néfastes sur la faune locale et a soulevé des préoccupations concernant la santé publique en raison de l'exposition à des substances toxiques. L'explosion a également provoqué la formation d'un vaste nuage de vapeur contenant des gaz toxiques. Cela a exposé non seulement les travailleurs sur le site, mais aussi les résidents des communautés environnantes à des niveaux dangereux de pollution atmosphérique. Les agents d'extinction utilisés pour combattre l'incendie ont contribué à une pollution importante des écosystèmes aquatiques. Les hydrocarbures se sont infiltrés dans les cours d'eau, affectant la qualité de l'eau et la santé des habitats aquatiques. De plus, l'exposition aux produits chimiques libérés lors de l'accident a soulevé des inquiétudes concernant les effets sur la santé humaine, tant immédiats que différés. L'accident a également causé des dommages matériels considérables aux infrastructures environnantes et a entraîné des pertes économiques importantes pour les entreprises locales en raison de la fermeture temporaire de certaines zones et de la nécessité de mesures de nettoyage [Baker et al., 2019].



Figure 1.6 | Accident de Caribbean Petroleum Corporation (CAPECO), Bayamón, Porto Rico

(e) Feux de Bac au Terminal RTE de Skikda, octobre 2005

Le 4 octobre 2005, à 10h00 du matin, un incendie s'est déclaré sur le bac de pétrole brut S106 au terminal stockage de Skikda qui est opéré par la Section Transport (RTE) de Sonatrach et se trouve dans la Zone Industrielle de Skikda et reçoit du pétrole brut par un pipeline venant de Haoud El Hamra, et celui-ci s'est répandu plus tard au bac S105 voisin. L'incendie fut complètement éteint le 12 octobre et les deux bacs furent complètement détruits. Au matin du 4 octobre, le gardien de la sûreté, en service dans la guérite située au coin sud-est du terminal, a éteint les projecteurs à 7h00. Ce matin-là, les conditions météorologiques étaient brumeuses avec peu de vent, ce qui a pu influencer la dispersion des gaz. De sa position, il avait une excellente vue sur l'incident et son témoignage s'est avéré crucial pour comprendre ce qui s'est passé. Un projet d'installation d'éclairage antidéflagrant (ADF) était en cours, et un électricien sous-traitant travaillait ce jour-là sur le bac S105. Bien qu'il ait eu une autorisation de travail valide, son implication dans l'incident était indirecte. Deux opérateurs du terminal ont commencé leur journée et ont décidé de faire une ronde vers 9h30. En se dirigeant vers le bac S101, ils ont remarqué une forte odeur de gaz en passant près du bac S106. Après avoir vérifié les vannes de purge du bac S106, ils ont constaté qu'elles étaient fermées. Cependant, leur véhicule a calé en raison d'une accumulation potentielle de gaz. En revenant vers la guérite pour signaler l'odeur de gaz, ils ont croisé deux électriciens de Sonatrach qui effectuaient leur ronde près du bac S101. Les opérateurs ont alors averti leur superviseur, qui a demandé au chef de laboratoire d'analyser la tension de vapeur réelle (TVR) du bac S106 pour comprendre l'origine de l'odeur. C'est à ce moment précis qu'une déflagration a été entendue. Le bac S106 était en cours de remplissage depuis 21h40 la veille et affichait un niveau de 10,72 m, soit environ 70 % de sa capacité totale de 50 000 m³. La TVR mesurée dans le bac avant cet incident était de 0,773 kg/cm². Les deux électriciens victimes de l'explosion avaient pour mission ce matin-là de compter les points d'éclairage ADF installés par le sous-traitant. N'ayant pas besoin d'une autorisation de travail pour accéder au site, ils n'ont pas informé la salle de contrôle de leurs activités, ce qui constitue une violation des procédures établies. Après avoir discuté avec l'électricien sous-traitant près du bac S105, les deux électriciens ont poursuivi leur ronde. Cependant, au point le plus bas de la route adjacente au bac S106, leur véhicule a calé à nouveau. Après plusieurs tentatives infructueuses pour redémarrer le moteur, celui-ci s'est emballé et c'est à ce moment-là que le nuage de gaz s'est enflammé, embrasant le toit du bac S106 ainsi que le véhicule, entraînant la mort tragique des deux passagers.

7 Conclusion

Ce chapitre a permis de mettre en lumière les risques inhérents à l'industrie pétrolière et leurs impacts environnementaux. Après avoir défini et contextualisé la notion de risque, une classification détaillée des différentes typologies de risques a été établie, notamment ceux liés aux stockages des hydrocarbures. L'étude des réservoirs de stockage a mis en évidence les principaux dangers associés à ces infrastructures, ainsi que les phénomènes pouvant engendrer des incidents majeurs. L'impact environnemental des activités pétrolières a également été abordé, notamment la pollution des sols, des eaux et les émissions atmosphériques. Enfin, l'analyse des incidents passés et des retours d'expérience a souligné l'importance des mesures de prévention et

de gestion des risques. Ainsi, ce chapitre met en exergue la nécessité d'une approche rigoureuse et proactive pour limiter les risques et leurs conséquences sur l'environnement et la sécurité.

CHAPITRE 2

Analyse des risques industriels

1 Introduction

Dans le contexte contemporain, l'acceptation sociale de l'outil industriel est de plus en plus fragile, malgré sa contribution essentielle à la prospérité économique. La survenue d'accidents majeurs soulève des interrogations fondamentales quant à l'efficacité des stratégies de gestion des risques. De tels accidents mettent en lumière la nécessité impérieuse d'une gestion rigoureuse des risques dans les sociétés industrielles. La gestion des risques est définie comme un ensemble d'activités coordonnées visant à diriger et piloter un organisme face aux risques. Ce processus systématique inclut l'identification, l'analyse, l'évaluation et le traitement des menaces ou incertitudes pouvant affecter une organisation. En analysant la probabilité et l'impact des risques, les organisations peuvent développer des stratégies pour minimiser les dommages tout en maximisant les opportunités. Ces stratégies passent par la mise en œuvre de toutes les dispositions organisationnelles et techniques visant à réduire leur probabilité d'occurrence ou à diminuer leur gravité. L'analyse des risques, en tant qu'élément central du processus de gestion des risques, permet de sélectionner les moyens les plus appropriés pour maîtriser les dangers d'accidents. Dans cette optique, la sûreté de fonctionnement, qui se présente comme un ensemble structuré de méthodes et de concepts, s'avère un outil essentiel pour minimiser ces risques au sein des organisations permettant l'utilisation systématique des informations disponibles pour identifier les dangers et estimer le risque.

2 Gestion des risques

La gestion des risques est un processus structuré qui englobe l'identification des dangers, l'analyse des risques, l'évaluation des risques et la maîtrise des risques résiduels auxquels une organisation est exposée. Cette définition s'aligne sur les concepts présentés dans le Guide ISO/CEI 51:2014. En tant que processus continu et intégré, la gestion des risques vise à réduire la probabilité d'occurrence des risques et l'ampleur de leurs conséquences potentielles, par le biais d'un classement

basé sur la probabilité d'occurrence et la gravité de l'impact. Cette hiérarchisation permet de prioriser et de traiter les risques les plus significatifs [ISO/IEC, 2014].

Dans son approche conventionnelle, la gestion du risque se présente comme un processus itératif structuré autour des phases suivantes:

- **Appréciation du risque** : Cette étape comprend l'analyse et l'évaluation du risque, permettant d'en déterminer la nature, la probabilité et l'impact potentiel.
- **Acceptation du risque** : Une fois le risque évalué, il est nécessaire de déterminer s'il est acceptable en l'état, en tenant compte des objectifs de l'organisation et de sa tolérance au risque.
- **Maîtrise ou réduction du risque** : Si le risque n'est pas acceptable, des mesures doivent être mises en œuvre pour le maîtriser (c'est-à-dire le maintenir à un niveau acceptable) ou le réduire (c'est-à-dire diminuer sa probabilité ou son impact).

2.1 Analyse des risques

La norme ISO/IEC Guide 51:2014 définit l'analyse des risques comme l'utilisation systématique des informations disponibles pour identifier les dangers et estimer le risque. L'analyse des risques vise tout d'abord à identifier les sources de dangers et les situations associées qui peuvent conduire à des dommages sur les personnes, l'environnement ou les biens. Dans un second temps, l'analyse des risques permet de mettre en lumière les barrière de sécurité existantes en vue de prévenir l'apparition d'une situation dangereuse (prévention) ou d'en limiter les conséquences (protection) [ISO/IEC, 2014].

2.2 Evaluation des risques

L'évaluation du risque, selon la norme [ISO/IEC, 2014], est une procédure reposant sur l'analyse préalable des risques, ayant pour objectif de déterminer si le seuil de risque tolérable est respecté. Sur le plan pratique, cette phase peut être complétée par une quantification détaillée et précise des grandeurs caractérisant le risque, se distinguant ainsi d'une simple estimation simplifiée. La complexité de ce processus d'évaluation est intrinsèquement liée aux critères définissant l'acceptation du risque.

2.3 Maîtrise ou réduction des risques

La réduction du risque, également appelée maîtrise du risque, englobe l'ensemble des actions ou dispositions mises en œuvre dans le but de diminuer la probabilité d'occurrence ou la gravité des dommages liés à un risque spécifique [ISO/IEC, 2014]. De telles mesures doivent être considérées dès lors que le risque en question est jugé inacceptable. De manière générale, les mesures de maîtrise du risque concernent :

- La prévention, qui vise à réduire la probabilité d'occurrence de la situation de danger à l'origine du dommage.
- La protection, qui vise à limiter la gravité du dommage considéré.

Les mesures de réduction du risque doivent être envisagées et mises en œuvre tant que le risque est jugé inacceptable

3 Démarche de l'analyse des risques d'une installation industrielle

La démarche d'analyse des risques associées à une installation industrielles est composée de plusieurs étapes, à savoir:

3.1 Définition du système et des objectifs à atteindre

La phase préliminaire est essentielle pour établir un cadre précis pour l'analyse des risques. Étant donné la complexité potentielle et les ressources considérables que l'analyse peut nécessiter, il est impératif de définir clairement le système étudié et de délimiter sans ambiguïté la portée de l'étude. La définition des objectifs de l'analyse des risques constitue également une étape importante, notamment pour déterminer les critères d'acceptabilité des risques. En fonction des objectifs spécifiques, l'approche méthodologique et les outils employés peuvent varier de manière significative [INERIS, 2012].

3.2 Collecte des données essentielles à l'analyse des risques

La collecte des informations indispensables à l'analyse des risques constitue une étape primordiale et particulièrement chronophage du processus. Elle s'articule autour des axes suivants [INERIS, 2012]:

- Description fonctionnelle et technique du système étudié : Cette étape implique une caractérisation approfondie du système, comprenant, une analyse des fonctions assurées par le système, une description de la structure du système, incluant ses composantes et leurs interrelations. La spécification des conditions de fonctionnement nominales du système et la définition des conditions d'exploitation, englobant les procédures et les modes opératoires.
- Caractérisation de l'environnement du système : Il s'agit d'identifier et de décrire les éléments susceptibles d'être affectés par le système (éléments vulnérables) ainsi que les sources d'agression externes potentielles, en distinguant leurs différentes typologies.
- Identification des potentiels de danger, tant internes qu'externes : Cette phase consiste à recenser de manière exhaustive les potentiels de danger intrinsèques au système (dangers internes) et les menaces provenant de l'environnement extérieur (dangers externes).
- Analyse des incidents et accidents passés : L'exploitation du retour d'expérience (REX) repose sur l'analyse des incidents et accidents survenus sur le site étudié et les événements similaires ayant affecté des installations comparables, permettant d'identifier des vulnérabilités ou des scénarios de risques non anticipés.

3.3 Définition de la démarche à mettre en œuvre

La définition précise de la démarche d'analyse des risques implique la sélection des outils les plus appropriés, la constitution d'un groupe de travail multidisciplinaire et, le cas échéant, l'établissement d'échelles d'évaluation des risques ainsi que d'une grille de criticité. Cette étape repose sur les éléments suivants [INERIS, 2012] :

- Choix des méthodes d'analyse des risques: Il existe un large éventail d'outils et de méthodes dédiés à l'identification des dangers et des risques associés à un procédé ou une installation. Parmi les plus fréquemment utilisées, on peut citer : l'Analyse Préliminaire des Risques (APR), l'Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité (AMDEC), l'étude des dangers (HAZOP), l'Arbre de Défaillances Déductif (ADD), l'Arbre d'Événements (ADE), etc. Ces méthodes, utilisées individuellement ou en combinaison, permettent généralement d'atteindre les objectifs d'une analyse des risques portant sur un procédé ou une installation.
- Constitution d'un groupe de travail: De manière générale, les méthodes d'analyse des risques sont conçues pour être mises en œuvre dans le cadre d'un groupe de travail. L'intérêt principal réside dans la confrontation d'avis et de remarques de personnes ayant des expériences et des connaissances complémentaires. Cette diversité de points de vue favorise un examen aussi exhaustif que possible des situations et des dangers.
- Échelles d'évaluation des risques: Il est essentiel de définir, en amont de l'analyse des risques, des échelles d'évaluation des risques en termes de probabilité et de gravité, ainsi qu'une grille de criticité explicitant les critères d'acceptabilité sur lesquels le groupe de travail se basera pour proposer des mesures de maîtrise supplémentaires.

4 Méthodes d'analyse des risques

L'analyse des risques, définie comme l'utilisation systématique d'informations pour identifier les sources de danger et estimer les risques, est un processus essentiel pour attribuer des valeurs à la probabilité et aux conséquences d'un risque. L'objectif principal de ces méthodes est de réduire le risque global et de prévenir les défaillances inattendues des systèmes d'exploitation, en reconnaissant les événements dangereux susceptibles de perturber le bon déroulement des processus.

4.1 Approches des méthodes d'analyse des risques

Dans le domaine de l'analyse des risques (voire figure 2.1), les méthodologies traditionnelles se répartissent en deux catégories principales : qualitative et quantitative. L'analyse quantitative évalue le risque en estimant la fréquence et les conséquences potentielles, tandis que l'analyse qualitative est appropriée lorsque les risques sont faibles et bien compris. Chaque catégorie peut être subdivisée en trois approches : déterministe, probabiliste, et une combinaison des deux [Tixier et al., 2002].

Les méthodes déterministes considèrent le produit, l'équipement, et la quantification des conséquences pour différentes cibles, telles que les personnes, l'environnement, et les équipements.

Cette approche repose sur la connaissance et la certitude de l'apparition d'un danger et de ses conséquences.

À l'opposé, les méthodes probabilistes s'appuient sur la probabilité ou la fréquence d'apparition d'une situation dangereuse ou d'un accident potentiel. Elles se concentrent principalement sur la probabilité de défaillances des équipements ou des composants.

Enfin, les méthodes combinant approches probabilistes et déterministes sont principalement utilisées pour examiner l'ensemble des établissements industriels. Ces méthodes permettent une analyse plus complète en intégrant à la fois la certitude des conséquences et la probabilité de leur occurrence.

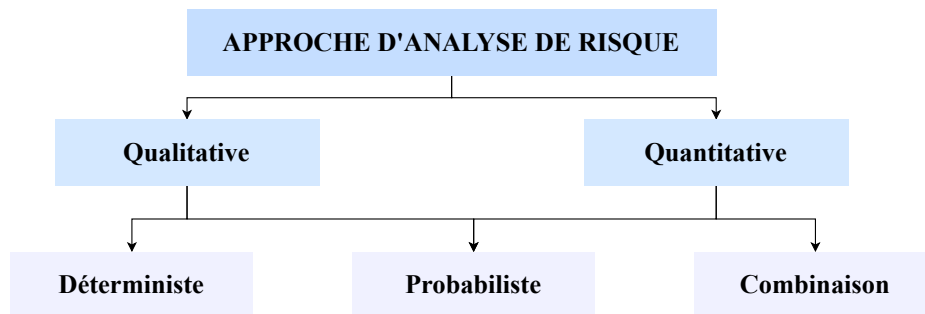


Figure 2.1 | Typologie des méthodes d'analyse des risques

4.2 Types des méthodes d'analyse des risques

Dans le cadre de l'analyse des risques, on distingue deux types principaux de méthodes : quantitatives et qualitatives [INERIS, 2012].

- **Méthodes quantitatives** : Ces analyses s'appuient sur des outils mathématiques pour évaluer la sûreté de fonctionnement, notamment la sécurité. L'évaluation quantitative peut impliquer des calculs de probabilités, comme lors de l'estimation quantitative de la probabilité d'occurrence d'un événement redouté, à l'aide d'arbres de défaillances. Elle peut également recourir à des modèles différentiels probabilistes tels que les chaînes de Markov, les réseaux de Pétri, les réseaux Bayesian ou les automates d'états finis.
- **Méthodes qualitatives** : Des méthodes comme l'analyse préliminaire des risques (APR) et l'Hazard and Operability Study (HAZOP) demeurent qualitatives, même si elles peuvent parfois mener à des estimations de fréquences d'occurrence avant la classification des risques. La plupart de ces méthodes adoptent une approche inductive, allant des causes aux conséquences potentielles. Parallèlement, il existe des méthodes déductives visant à identifier les combinaisons de causes conduisant à des événements redoutés. L'évaluation qualitative du risque permet d'étudier un événement ou un contrôle réglementaire et de comprendre la qualité de son implémentation.

4.3 Démarches des méthodes d'analyse des risques

Dans le domaine de l'analyse des risques, deux démarches fondamentales se distinguent: la démarche inductive et la démarche déductive [INERIS, 2012].

- La démarche inductive débute par une défaillance ou une combinaison de défaillances, et vise à identifier les conséquences de cette ou ces défaillances sur le système ou son environnement. Essentiellement, cette méthode part des causes pour déterminer les effets. Les méthodes inductives couramment utilisées dans le domaine des risques accidentels comprennent : l'analyse préliminaire des risques (APR), l'analyse des modes de défaillance, de leurs effets et de leur criticité (AMDEC), l'Hazard and Operability Study (HAZOP), l'analyse par arbre d'événements (ADE), et la méthode "What-If".
- À l'opposé, la démarche déductive part de l'état de défaillance du système et cherche à identifier les causes susceptibles de conduire à cet état. Cette approche remonte donc des effets vers les causes. L'analyse par arbre de défaillances (Arbre de Défaillances, ou Fault Tree Analysis - FTA) constitue l'une des principales méthodes déductives.

4.4 Méthodes statiques et dynamiques dans l'analyse des risques

Dans le cadre de l'analyse des risques, les méthodes peuvent être classées selon leur prise en compte du facteur temporel, distinguant ainsi les approches statiques et dynamiques [INERIS, 2012].

- Méthodes statiques : Ces méthodes analysent le système d'un point de vue structurel, sans considérer les évolutions au cours du temps. Elles s'appuient sur un modèle mathématique booléen du système, qui identifie les combinaisons de défaillances conduisant à un dysfonctionnement, mais sans représenter les interrelations temporelles qui affectent le système.
- Méthodes dynamiques : À l'inverse, les méthodes dynamiques permettent de prendre en compte les aspects comportementaux et temporels. La mise en œuvre de ces méthodes nécessite des décompositions hiérarchiques, matérielles ou fonctionnelles, du système étudié. Ces méthodes sont particulièrement utiles pour étudier les systèmes dynamiques. Elles permettent de suivre l'évolution de la configuration des composants du système au cours du temps.

5 Aperçu des méthodes d'identification et d'analyse des risques industriels

Dans le cadre de cette recherche, une attention particulière est accordée aux principales méthodes d'analyse des risques industriels. Bien qu'il existe de nombreuses autres approches, cette section se concentre sur les méthodes utilisées dans le contexte de notre étude

5.1 APR (Analyse préliminaire des risques)

L'Analyse Préliminaire des Risques (APR) est une méthode d'identification des dangers appliquée à un stade précoce de la conception. Cette méthode est inductive, partant de la cause

du dysfonctionnement pour en déterminer les conséquences. Selon les CCPS Guidelines, l'APR est particulièrement utile lors du développement préliminaire d'une installation, notamment lorsqu'il existe peu d'informations sur les dangers potentiels, comme c'est le cas avec un nouveau procédé. Les informations requises pour cette étude comprennent les critères de conception, les spécifications des matériaux et des équipements.

L'analyse porte sur : les matières premières, les produits intermédiaires et les produits finaux, l'équipement de l'installation, l'équipement de sécurité, les interfaces entre les composants du système, l'environnement d'exploitation et les opérations (maintenance, tests, etc.)

L'APR identifie l'ensemble des dangers potentiels susceptibles de conduire à un accident. Les événements sont classés en fonction de leur gravité, permettant de formuler et de mettre en œuvre des mesures de contrôle des risques et des systèmes d'atténuation. Bien qu'elle soit généralement appliquée au début du cycle de vie d'un projet, elle peut également être utilisée rétrospectivement sur un système existant pour mettre en place des mesures de sécurité correctives. [Hoyland and Rausand, 2009]

5.2 HAZOP (Hazard and Operability Study)

La méthode HAZOP (Hazard and Operability Study), dont l'origine remonte au début des années 1970 au sein de la société Imperial Chemical Industries (ICI), est une méthodologie d'analyse des risques qui a été adaptée et mise en œuvre dans divers secteurs d'activité. Cette méthode repose sur un examen systématique des déviations potentielles des paramètres de fonctionnement d'une installation, dans le but d'identifier leurs causes et leurs conséquences.

La méthode HAZOP s'avère particulièrement pertinente pour l'analyse des systèmes thermo-hydrauliques, où des paramètres tels que le débit, la température, la pression, le niveau et la concentration jouent un rôle déterminant dans la sécurité de l'installation. De par sa nature, cette méthode requiert l'examen approfondi des schémas et plans de circulation des fluides, notamment les schémas P&ID (Piping and Instrumentation Diagram). L'analyse HAZOP vise à prévenir les déviations de procédés qui peuvent mener à des pertes de confinement de matières et d'énergies, sources d'accidents de procédés.

La méthodologie s'appuie sur des mots-clés tels que absence, plus, moins, ainsi que.. et autres combinés à des paramètres de procédé. Ces combinaisons permettent à l'équipe de générer systématiquement des scénarios de déviations potentielles (par exemple, « plus de pression » ou « absence de débit ») [Dunjó et al., 2010].

5.3 AMDEC (Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité)

L'Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets (AMDE), connue également sous sa forme étendue d'Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité (AMDEC), est une méthodologie d'analyse préventive des risques. Initialement développée dans l'industrie aéronautique durant les années 1960, elle a depuis étendu son application à divers secteurs tels que la chimie, le pétrole, le nucléaire, l'automobile, le matériel médical, et le ferroviaire. L'AMDE/AMDEC est particulièrement adaptée à l'étude des défaillances potentielles de matériaux, d'équipements, de produits, de processus, ou de systèmes, qu'ils soient électriques, mécaniques, hydrauliques, ou combinant plusieurs technologies.

Dans une démarche d'analyse des risques, l'AMDE/AMDEC joue un rôle essentiel en iden-

tifiant les causes et les effets des défaillances potentielles d'un procédé ou d'un équipement de production. Elle permet de déterminer les actions nécessaires pour éliminer ou réduire ces défaillances, contribuant ainsi à l'amélioration continue des performances industrielles. Cette approche structurée et prédictive aide à anticiper les problèmes avant qu'ils ne surviennent, en mettant l'accent sur l'organisation du système plutôt que sur les individus.

L'AMDE/AMDEC est une méthode inductive qui permet de réaliser une analyse qualitative et quantitative de la fiabilité ou de la sécurité d'un système. Sa mise en œuvre nécessite [INERIS, 2012]:

- La division du système en éléments constitutifs.
- La définition de la structure fonctionnelle du système.
- La définition des modes de défaillance.

5.4 ADD (Arbres de défaillances)

L'analyse par arbre de défaillances (ADD), ou Fault Tree Analysis (FTA) est un outil graphique largement utilisé dans les études de sécurité et de fiabilité des systèmes. Développée au début des années 1960 par la compagnie américaine Bell Téléphone (Bell Laboratories) pour évaluer la sécurité des systèmes de tir de missiles, elle fut historiquement la première méthode mise au point en vue de procéder à un examen systématique des risques.

Cette méthode déductive vise à représenter graphiquement les combinaisons possibles d'événements qui permettent la réalisation d'un événement indésirable prédéfini. L'arbre de défaillances est ainsi formé de niveaux successifs d'événements qui s'articulent par l'intermédiaire de portes logiques (AND, NOT, OR...). En adoptant cette représentation et la logique déductive (allant des effets vers les causes), il est possible de remonter d'effets en causes de l'événement indésirable à des événements de base, indépendants entre eux.

L'ADD est appliquée dans de nombreux domaines tels que l'aéronautique, le nucléaire, l'industrie chimique. Elle est également utilisée pour analyser a posteriori les causes d'accidents qui se sont produits. Dans ces cas, l'événement redouté final est généralement connu car observé. On parle alors d'analyse par arbre des causes, l'objectif principal étant de déterminer les causes réelles qui ont conduit à l'accident [Ericson and Ll, 1999].

5.5 ADE (Arbres des événements)

L'analyse par arbre d'événements (ADE), développée au début des années 1970 pour évaluer les risques des centrales nucléaires à eau légère, s'est étendue à d'autres secteurs industriels. Cette méthode est particulièrement adaptée à l'étude de sous-systèmes bien définis et aide à analyser les systèmes comportant de nombreux dispositifs de sécurité et leurs interactions.

Contrairement à l'analyse par arbre de défaillances (ADD), qui vise à déterminer de manière déductive les causes d'un événement indésirable, l'ADE suppose la défaillance d'un composant ou d'une partie du système et s'attache à déterminer les événements qui en découlent. L'ADE permet d'estimer la dérive du système en envisageant systématiquement le fonctionnement ou la défaillance des dispositifs de détection, d'alarme, de prévention, de protection ou d'intervention.

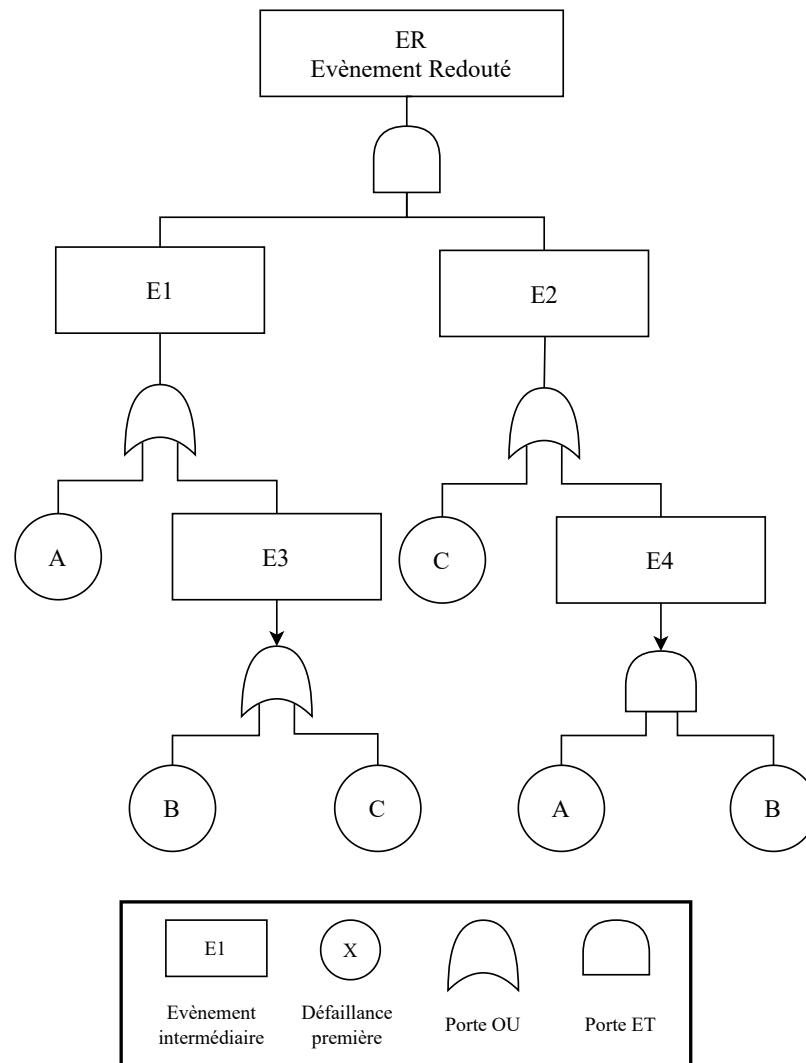


Figure 2.2 | Exemple d'arbre de défaillance

L'ADE est une méthode inductive qui permet d'examiner, à partir d'un événement initiateur, l'enchaînement des événements pouvant conduire ou non à un accident potentiel. Elle permet de déterminer l'enchaînement des événements ainsi que le résultat final : succès ou échec. La réalisation d'un arbre d'événements permet en définitive de déterminer la probabilité d'occurrence des différentes conséquences à partir des séquences identifiées [Andrews and Dunnett, 2002].

5.6 Bow-tie (Méthode nœud papillon)

Le diagramme nœud papillon (ou diagramme « Bow-Tie »), développé dans les années 1970 par la compagnie Shell, est une approche arborescente largement utilisée dans les pays européens, notamment aux Pays-Bas, où une approche probabiliste de la gestion des risques est privilégiée.

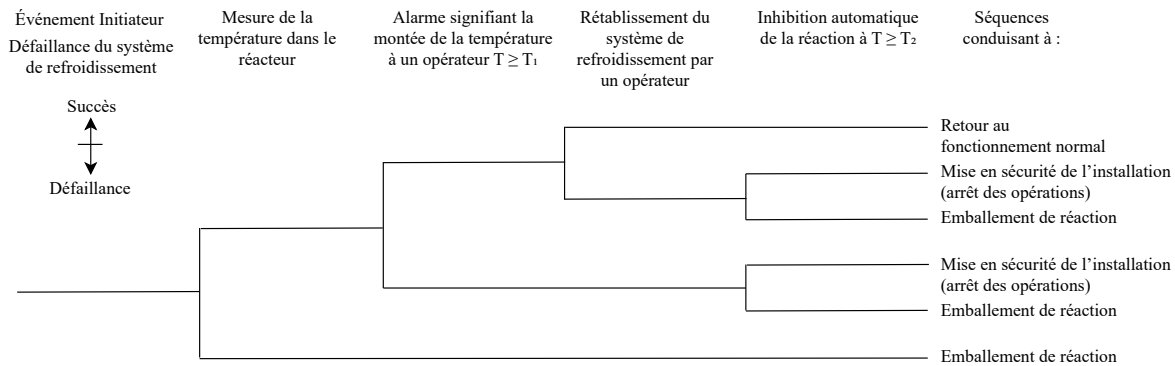


Figure 2.3 | Exemple d'arbre d'évènement

Ce type de diagramme est généralement utilisé pour illustrer les causes et les conséquences d'une défaillance, avec un déroulement logique de gauche à droite. L'événement indésirable est représenté au centre, les causes potentielles sont indiquées à gauche, et les conséquences possibles à droite. Des barrières de sécurité sont également intégrées au diagramme, celles situées du côté des "causes" visant à réduire la probabilité d'occurrence de l'événement indésirable, tandis que celles du côté des "conséquences" ont pour objectif d'atténuer les impacts potentiels de cet événement.

Le diagramme nœud papillon combine les caractéristiques d'un arbre de défaillances et d'un arbre d'événements, offrant ainsi une représentation visuelle complète des risques et des mesures de prévention associées [Sklet, 2006].

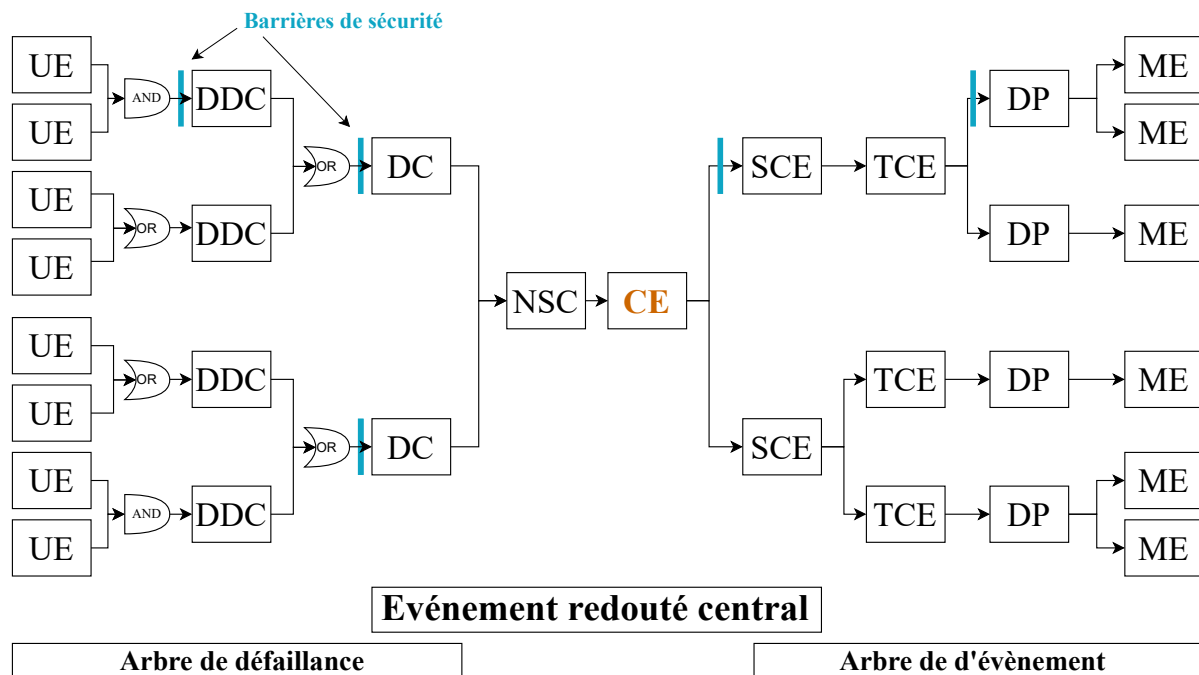


Figure 2.4 | Exemple Bow-Tie

5.7 MIMAH (Method for the Identification of Major Accident Hazards)

La méthode MIMAH (Method for the Identification of Major Accident Hazards), développée dans le cadre du projet européen ARAMIS (Accidental Risk Assessment Methodology for Industries in the framework of the Seveso II directive), vise à identifier de manière exhaustive les scénarios d'accidents majeurs potentiels sur un site industriel.

S'appuyant sur l'approche en nœud papillon, la méthode MIMAH considère systématiquement, pour chaque équipement critique identifié, l'ensemble des événements physiquement envisageables, sans tenir compte des barrières de sécurité existantes, dans le but de définir un ensemble complet de scénarios, incluant les plus catastrophiques à partir de la typologie d'équipement et des dangers associés à la substance impliquée.

La contribution majeure de la méthode MIMAH a été de définir une structure précise de nœud papillon et de répertorier de manière précise et exhaustive les équipements, les événements critiques et leurs conséquences. La méthode MIMAH associe à chaque équipement un ensemble d'événements critiques (EC).

Les événements critiques sont définis comme des pertes de confinement pour les fluides ou des pertes d'intégrité physique pour les solides. La liste exhaustive comprend douze événements critiques, incluant brèche, effondrement, explosion, etc. Sur la base d'une description détaillée de l'installation, incluant les substances chimiques manipulées (utilisées, produites ou stockées), la méthodologie MIMAH permet d'identifier l'ensemble des événements critiques potentiels au sein de ladite installation.

Pour chaque EC, MIMAH fournit à l'utilisateur un ensemble d'arbres de défaillance génériques, basés sur les causes les plus fréquemment observées. À partir de ces arbres de défaillance génériques, l'utilisateur construit des arbres de défaillance spécifiques qui prennent en compte la spécificité de l'installation étudiée, tels que les types de processus utilisés ou la présence d'équipements. Les arbres de défaillance spécifiques sont principalement obtenus par la suppression des causes et des conséquences non pertinentes dans le contexte, sans considération de probabilité à ce stade [Delvosalle et al., 2004b].

Par la suite, la méthode MIMAH offre la possibilité d'identifier l'ensemble des conséquences de chaque événement critique, tant en termes d'événements secondaires que de phénomènes dangereux, ceci étant ensuite structuré et analysé au sein d'un arbre des événements. La pertinence et l'exhaustivité des arbres des causes et des événements sont vérifiées par comparaison avec les analyses d'accidents passés, disponibles dans les bases de données telles que MARS, HADES et MHIDAS [Debray and Salvi, 2005, Sarvestani et al., 2021].

De manière simplifiée, la mise en œuvre de la méthode MIMAH peut être représentée par le logigramme suivant 2.5. Notamment, la méthode MIMAH s'applique à chaque équipement critique identifié sur un site industriel.

6 Concepts Généraux de la Fiabilité et de la probabilité

6.1 Fiabilité

Selon [Lees, 2012], les définitions de la fiabilité sont :

Définition 01: La fiabilité représente l'aptitude d'un composant à assurer une fonction donnée

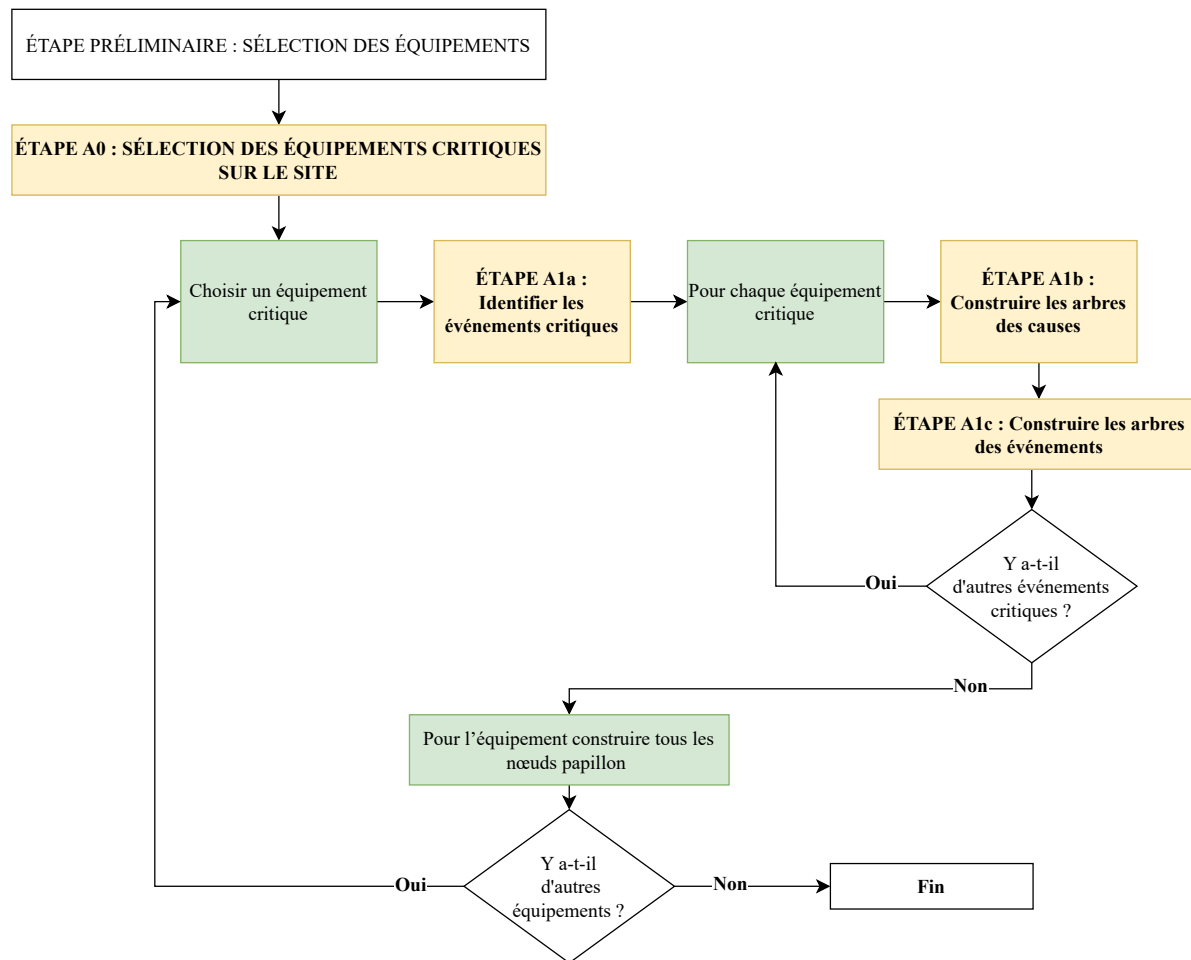


Figure 2.5 | Etape de la méthode MIMAH (Method for the Identification of Major Accident Hazards)

avec le niveau de performance requis, dans un environnement spécifié et sur une période de temps déterminée. Il est précisé que, dans les définitions relatives à la fiabilité, le terme "temps" peut être remplacé, selon le contexte, par "distance", "cycles" ou d'autres quantités ou unités.

Définition 02: La probabilité qu'un élément accomplisse une fonction requise dans des conditions données et pendant une période spécifiée". Cette définition met en évidence plusieurs aspects importants de la fiabilité :

- Il s'agit d'une probabilité,
- Elle est fonction du temps,
- Elle est fonction de conditions définies
- Et elle est fonction de la définition de la défaillance.

La défaillance peut être :

- Une défaillance en fonctionnement,
- Une absence de fonctionnement sur demande,
- Un fonctionnement avant la demande et,
- Un fonctionnement après l'arrêt de la demande.

La première de ces définitions s'applique à un équipement qui fonctionne en continu, tandis que les autres définitions s'appliquent à un équipement qui fonctionne sur demande.

6.2 Probabilité

Si la notion de probabilité peut sembler d'abord appréhendable intuitivement, mais le terme possède en réalité plusieurs significations. De plus, ces distinctions revêtent une importance pratique non négligeable. Elles sont pertinentes, par exemple, pour déterminer le poids relatif à accorder aux données de terrain et aux autres informations dont disposent les individus [Lees, 2012].

- (a) **Équi-probabilité** : Si une situation présente n issues équiprobables et mutuellement exclusives, et si, parmi ces issues n_A correspondent à l'événement A , alors la probabilité $P(A)$ de l'événement A est donnée par :

$$P(A) = n_A/n \quad (2.1)$$

Cette probabilité peut être évaluée a priori, sans qu'il soit besoin de procéder à des expériences.

Un exemple courant est celui du jet d'un dé non biaisé, présentant six faces équiprobables : la probabilité d'obtenir la face 1 est de $1/6$. On peut également citer le prélèvement aléatoire d'une boule dans un sac contenant quatre boules blanches et deux boules rouges : la probabilité de prélever une boule rouge est de $1/3$. Le principe d'équiprobabilité trouve également à s'appliquer dans ce second cas, car, bien que les probabilités de prélever une boule rouge et une boule blanche soient distinctes, la probabilité de prélever une boule spécifique est identique pour chaque boule. Cette définition de la probabilité trouve cependant une application limitée en ingénierie, du fait de la difficulté à définir des contextes présentant des résultats équiprobables et mutuellement exclusifs.

- (b) **Fréquence relative** La seconde définition de la probabilité repose sur le concept de fréquence relative. Si une expérience est répétée n fois et si l'événement A se produit n_A fois au cours de ces répétitions, alors la probabilité $P(A)$ de l'événement A est donnée par :

$$P(A) = \lim_{n \rightarrow \infty} n_A/n \quad (2.2)$$

Cette probabilité ne peut être déterminée que par l'expérimentation. Cette définition de la probabilité est la plus largement utilisée en ingénierie. En particulier, c'est cette définition qui est implicitement employée lors de l'estimation de la probabilité à partir de données de défaillance issues du terrain.

- (c) **Probabilité subjective** La probabilité subjective, troisième définition de la probabilité, quantifie numériquement le degré de conviction qu'une personne attribue à la réalisation d'un événement. En l'absence d'informations suffisantes pour établir une probabilité théorique ou fréquentielle, cette approche s'appuie sur le jugement personnel et les observations subjectives, conduisant potentiellement à des estimations variables selon les individus.

6.3 Relations fondamentales en probabilité

Il convient, à ce stade, de présenter certaines relations fondamentales en probabilité. Celles-ci sont importantes dans le contexte de notre recherche, non seulement parce qu'elles constituent le socle des expressions de fiabilité, mais également parce qu'elles sont nécessaires pour l'étude de domaines tels que les arbres de défaillance [Lees, 2012].

(a) Théorie des ensembles et algèbre de Boole

Certaines définitions, opérations et lois de la théorie des ensembles sont présentées dans le tableau 2.1, et certaines d'entre elles sont illustrées par les diagrammes de Venn dans la Figure 2.6.

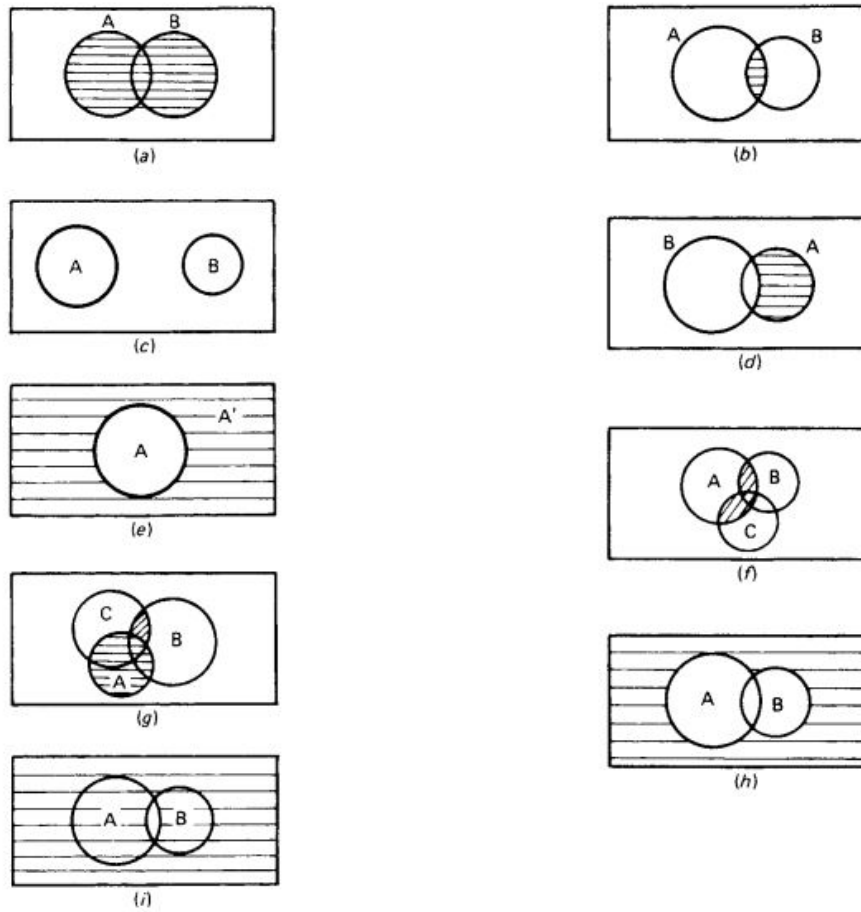
Ensemble / Opération	Définition
$\emptyset$	Ensemble vide
S	Ensemble exhaustif des éléments constitutifs de l'espace échantillonnal
$a \in A$	a est un élément de A
$A \subset B$	A est un sous-ensemble de B
$B \supset A$	B contient A
$A \subseteq B$	A est inclus ou égal à B
$A = B$	A et B ont les mêmes éléments
$C = A \cup B$	C contient tous les éléments de A et de B
$C = A \cap B$	C contient uniquement les éléments communs à A et B
$C = A \cap B = \emptyset$	A et B sont des ensembles disjoints dont l'intersection est vide
$C = A - B$	C contient tous les éléments de A qui ne sont pas des éléments de B
$A' = S - A$	A' contient tous les éléments de S qui ne sont pas des éléments de A

Tableau 2.1 | Quelques définitions, opérations et lois de la théorie des ensembles [Lees, 2012]

(b) Probabilité des unions

La probabilité d'un événement X survenant si au moins l'un des événements A_i se produit, et qui correspond par conséquent à l'union de ces événements, est :

$$P(A) = P(\cup_{j=1}^n A_i) \quad (2.3)$$

**Figure 2.6**

Quelques lois de la théorie des ensembles: (a): $A + B$, (b): $A \cdot B$, (c) Ensembles disjoints, (d) Différence d'ensembles: $A - B$, (e) Complémentaire d'un ensemble : A' , (f) Loi de distributivité, $A(B + C) = AB + AC$, (g) Loi de distributivité, $(A + B)(A + C) = A + BC$, (h) Loi de dualité (De Morgan), $(A + B)' = A'B'$, (i) Loi de dualité (De Morgan), $(AB)' = A' + B'$ [Lees, 2012]

Dans le cas de deux événements:

$$P(A) = P(A_1) + P(A_2) - P(A_1 \cdot A_2) \quad (2.4)$$

Dans le cas de trois événements:

$$\begin{aligned} P(A) = & P(A_1) + P(A_2) + P(A_3) \\ & - P(A_1 A_2) - P(A_1 A_3) - P(A_2 A_3) \\ & + P(A_1 A_2 A_3) \end{aligned} \quad (2.5)$$

Dans le cas de n événements:

$$\begin{aligned}
P(A) = & P(A_1) + P(A_2) + \cdots + P(A_n) \\
& - P(A_1A_2) - \cdots - P(A_{n-1}A_n) \\
& + P(A_1A_2A_3) + P(A_1A_2A_4) + \cdots + P(A_{n-2}A_{n-1}A_n) \\
& + \cdots + (-1)^{n-1}P(A_1A_2 \dots A_n)
\end{aligned} \tag{2.6}$$

Dans le cas d'événements indépendants (pour lesquels la probabilité de leur intersection est nulle), l'équation Eq. 2.3 se réduit à:

$$P(X) = \sum_{i=1}^n P(A_i) \tag{2.7}$$

(c) **Probabilité conjointe et marginale**

Jusqu'à présent, les événements considérés étaient les résultats d'une seule expérience. La section suivante aborde les événements issus de plusieurs sous-expériences.

La probabilité d'un événement X qui se produit uniquement si tous les n événements A_i se réalisent, et qui est donc l'intersection de ces événements, est :

$$\begin{aligned}
P(X) &= P(A_1 \dots A_n) \\
&= P\left(\bigcap_{i=1}^n A_i\right)
\end{aligned} \tag{2.8}$$

$P(A_1 \dots A_n)$ est la probabilité conjointe de l'événement

Étant donné n événements A_i mutuellement exclusifs et exhaustifs dans une sous-expérience, et un événement B dans une autre sous-expérience, la probabilité que l'événement X se produise est :

$$\begin{aligned}
P(X) &= P\left(\bigcup_{i=1}^n (A_i B)\right) \\
&= \sum_{i=1}^n P(A_i)P(B) \\
&= P(B)
\end{aligned} \tag{2.9}$$

$P(B)$ est la probabilité marginale de l'événement.

(d) **Probabilité conditionnelle**

Soit X un événement qui survient lorsque l'événement A se produit dans une première sous-expérience et l'événement B se produit dans une seconde sous-expérience, l'événement A étant conditionné par l'événement B . La probabilité de X est alors :

$$\begin{aligned}
P(X) &= P(AB) \\
&= P(A|B)P(B)
\end{aligned} \tag{2.10}$$

$P(A|B)$ est la probabilité que A se réalise, sachant que B s'est déjà réalisé (probabilité conditionnelle de A sachant B).

L'équation Eq. 2.10 permet de calculer une probabilité conjointe. Réciproquement, les probabilités marginales peuvent être déterminées à partir des probabilités conditionnelles:

$$\begin{aligned} P(X) &= P(B) \\ &= \sum_{i=1}^n P(B|A_i)P(A_i) \end{aligned} \quad (2.11)$$

(e) **Indépendance et indépendance conditionnelle**

Si les événements A et B sont indépendants :

$$\begin{aligned} P(AB) &= P(A|B)P(B) \\ &= P(A)P(B) \end{aligned} \quad (2.12)$$

Et cela est équivalent à:

$$P(A|B) = P(A) \quad (2.13)$$

(f) **Théorème de Bayes**

L'équation Eq. 2.10 présente une formulation du théorème de Bayes, un résultat fondamental en probabilités. Ce théorème se décline en diverses formes, parmi lesquelles :

$$\begin{aligned} P(AB) &= P(A|B)P(B) \\ &= P(B|A)P(A) \end{aligned} \quad (2.14)$$

$$\begin{aligned} P(A|B) &= P(AB)/P(B) \\ &= P(B|A)P(A)/P(B) \end{aligned} \quad (2.15)$$

6.4 Quelques relations de fiabilité

(a) **Fonction de fiabilité et taux de défaillance**

Si n équipements fonctionnent sans remplacement, alors après un temps t , notons $n_s(t)$ le nombre d'équipements ayant survécu et $n_f(t)$ le nombre d'équipements ayant subi une défaillance. La probabilité de survie, ou fiabilité, est alors donnée par, $R(t)$ [Lees, 2012]:

$$R(t) = 1 - \frac{n_f(t)}{n} \quad (2.16)$$

Le taux de défaillance instantané, ou taux de défaillance exprimé en fonction du nombre d'équipements survivants, $z(t)$, est

$$\begin{aligned} z(t) &= \frac{1}{n_s(t) - n} \frac{dn_f(t)}{dt} \\ &= -\frac{1}{R(t)} \frac{dR(t)}{dt} \\ &= -\frac{d[\ln R(t)]}{dt} \end{aligned} \quad (2.17)$$

La fonction de risque cumulatif $H(t)$ est:

$$H(t) = \int_0^t z(t) dt \quad (2.18)$$

Alors, par intégration de l'Équation Eq. 4.16 , la fiabilité $R(t)$ est:

$$\begin{aligned} R(t) &= \exp\left(-\int_0^t z(t) dt\right) \\ &= \exp[-H(t)] \end{aligned} \quad (2.19)$$

$R(t)$ est la fonction de fiabilité.

(b) **Fonction de densité de défaillance et fonction de distribution de défaillance**

Le taux de défaillance global, ou taux de défaillance exprimé en fonction du nombre initial d'équipements, $f(t)$ est [Lees, 2012]: :

$$\begin{aligned} f(t) &= \frac{1}{n} \frac{dn_f(t)}{dt} \\ &= -\frac{dR(t)}{dt} \end{aligned} \quad (2.20)$$

$f(t)$ est aussi appelé la 'fonction de densité de défaillance'. Le complément de la fiabilité, ou la non-fiabilité, $Q(t)$ est :

$$Q(t) = 1 - R(t) \quad (2.21)$$

$Q(t)$ est aussi appelé la fonction de distribution de défaillance et est alors communément noté $F(t)$.

La fonction de densité de défaillance et la fonction de distribution de défaillance sont souvent appelées, respectivement, 'densité de défaillance' ou 'fonction de densité' et 'distribution de défaillance', 'fonction de distribution' ou 'fonction de distribution cumulative'.

(c) **Relations entre les fonctions de base**

Les relations suivantes peuvent être facilement déduites des Équations Eq. 2.16 à Eq. 2.21 et sont particulièrement utiles [Lees, 2012]:

$$\begin{aligned} z(t) &= \frac{f(t)}{R(t)} \\ &= \frac{f(t)}{1 - Q(t)} \\ &= \frac{f(t)}{1 - F(t)} \end{aligned} \quad (2.22)$$

$$R(t) = \int_t^{\infty} f(t) dt \quad (2.23)$$

$$\begin{aligned} Q(t) &= F(t) \\ &= \int_0^t f(t) dt \end{aligned} \quad (2.24)$$

(d) **Distribution exponentielle**

Un cas particulier important est celui où le taux de risque $z(t)$ est constant [Lees, 2012]:

$$z(t) = \lambda \quad (2.25)$$

Alors,

$$R(t) = \exp(-\lambda t) \quad (2.26)$$

$$f(t) = \lambda \exp(-\lambda t) \quad (2.27)$$

$$Q(t) = 1 - \exp(-\lambda t) \quad (2.28)$$

Les quatre opérations sont présentées dans la figure 2.7.

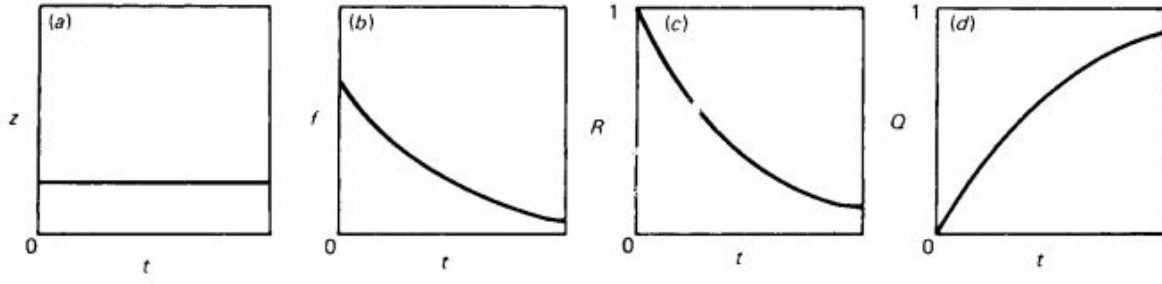


Figure 2.7 Distribution exponentiel: (a) Taux de défaillance, (b) Densité de défaillance, (c) Fiabilité, (d) Non fiabilité ou Défaillance [Lees, 2012]

Dans la Figure 2.7, les axes verticaux pour la fiabilité $R(t)$ et la non-fiabilité $Q(t)$ ont une plage de 0 à 1, tandis que ceux pour le taux de défaillance $z(t)$ et la fonction de densité de défaillance $f(t)$ sont proportionnels à λ .

Si la valeur de $\lambda(t)$ est faible :

$$R(t) = 1 - \lambda t, \quad \lambda t \ll 1 \quad (2.29)$$

$$Q(t) = \lambda t, \quad \lambda t \ll 1 \quad (2.30)$$

En l'absence d'informations spécifiques sur le comportement des défaillances, l'hypothèse d'un taux de défaillance constant est souvent privilégiée dans l'analyse de fiabilité. Cette hypothèse simplificatrice conduit à l'utilisation de la distribution exponentielle pour modéliser la durée de vie des équipements. La distribution exponentielle est particulièrement pertinente pour les systèmes fonctionnant en continu, tels que certains systèmes électroniques. Une caractéristique fondamentale de cette distribution est son absence de mémoire. Autrement dit, la probabilité de défaillance dans le futur ne dépend pas du temps de fonctionnement passé.

(e) Probabilité et taux de défaillance

La relation entre la non-fiabilité et le taux de défaillance, représentée par l'équation Eq. 2.30, ou plus généralement la relation entre la probabilité $P(t)$ et le taux de défaillance $z(t)$ est une relation importante. Il est fréquemment nécessaire, dans le domaine de la fiabilité, de calculer une probabilité à partir d'un taux, ou inversement, et c'est cette équation qui s'applique [Lees, 2012].

$$P(t) = 1 - \exp(-\lambda t) \quad (2.31)$$

7 Analyse des arbres de défaillance

Les techniques d'analyse des arbres de défaillances (ADD) peuvent être divisées en techniques quantitatives et techniques qualitatives. Les techniques qualitatives fournissent un aperçu sur la

structure de l'ADD et sont utilisées pour détecter les vulnérabilités du système. Les techniques quantitatives permettent de calculer des valeurs numériques sur l'arbre de défaillance. Elles peuvent être subdivisées en mesures d'importance, indiquant le degré de criticité d'un composant donné, et en mesures stochastiques, notamment les probabilités de défaillance.

7.1 Analyse qualitative

Les techniques qualitatives les plus importantes sont présentées, à savoir les coupes minimales, les chaînes minimales et les défaillances de cause commune.

7.1.1 Coupes minimales (MCS)

Un arbre de défaillance peut être analysé afin de déterminer les coupes minimales (minimal cut set-MCS). Les coupes minimales fournissent des informations importantes sur les vulnérabilités d'un système. Une coupe est un ensemble de composants (événements primaires ou de base) qui, combinés, peuvent provoquer la défaillance du système. Ainsi, si un arbre de défaillance contient des coupes avec seulement quelques éléments, ou des éléments dont la défaillance est très probable, cela peut entraîner un système peu fiable. La réduction des probabilités de défaillance de ces coupes est généralement un bon moyen d'améliorer la fiabilité du système. Une coupe minimale est une coupe qui ne contient aucune autre coupe ; en d'autres termes, si l'on retire un seul événement de la coupe minimale, l'événement sommet ne se produit plus. L'ensemble complet des coupes minimales représente les principaux modes de défaillance de l'événement sommet. Cette section décrit deux techniques d'analyse des coupes couramment utilisés : la méthode classiques basée sur la manipulation de l'expression booléenne de l'arbre de défaillance, et la méthode basée sur les diagrammes de décision binaires [Clark and Verwoerd, 2012, Coudert and Madre, 1993].

(a) Manipulation booléenne

Les méthodes classiques de détermination des coupes minimales sont les algorithmes ascendants (bottom-up) et descendants (top-down). Ces méthodes représentent chaque porte logique comme une expression booléenne des événements de base (BEs) et/ou d'autres portes logiques. Ces expressions sont ensuite combinées, développées et simplifiées pour obtenir une expression reliant l'événement sommet aux événements de base (BEs) sans aucune porte logique intermédiaire. Cette expression est appelée fonction de structure. À chaque étape, les expressions sont converties en forme normale disjonctive (FND), de sorte que chaque conjonction représente une coupe minimale.

(b) Diagrammes de décision binaires

Une méthode efficace pour trouver les coupes minimales (MCS) consiste à convertir l'arbre de défaillance en un diagramme de décision binaire (BDD). Un BDD est un graphe acyclique orienté qui représente une fonction booléenne $f : \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\} \rightarrow \{0, 1\}$.

Les feuilles d'un BDD sont étiquetées soit par 0, soit par 1. Les autres nœuds sont étiquetés par une variable x_i et possèdent deux enfants. L'enfant gauche représente la fonction lorsque $x_i = 0$, l'enfant droit représente la fonction lorsque $x_i = 1$. Les BDD sont largement utilisés dans la vérification de modèles, pour représenter efficacement l'espace d'état et la relation de transition.

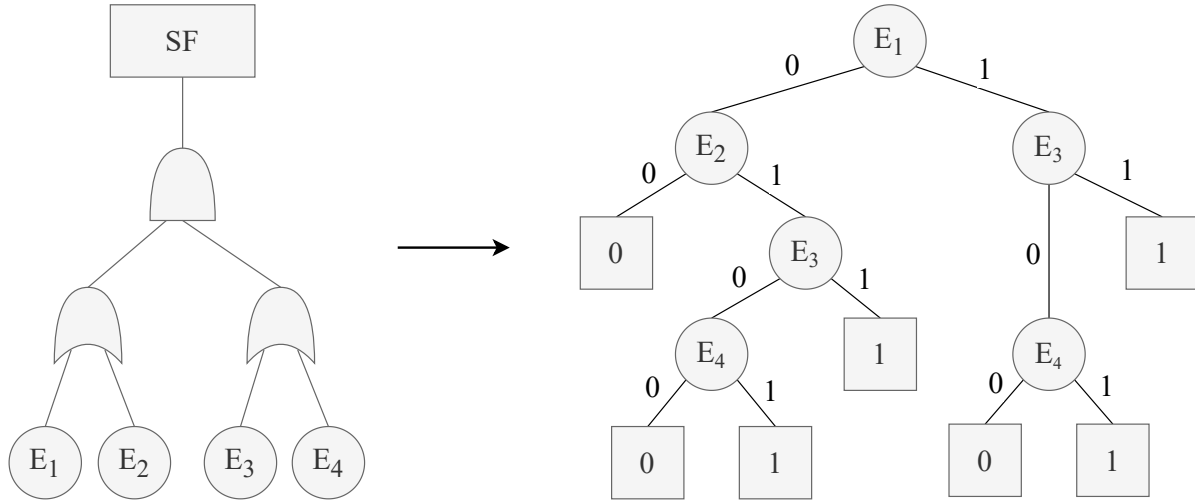


Figure 2.8 | Exemple de conversion de l'ADD en BDD

7.1.2 Chaînes minimales (MPS)

Une chaîne minimale (minimal path set-MPS) est essentiellement l'opposé d'une coupe minimale (MCS). C'est un ensemble minimal de composants tel que, si ces composants ne tombent pas en panne, le système reste opérationnel. Les chaînes minimales peuvent, tout comme les coupes minimales (MCS), servir de point de départ pour améliorer la fiabilité du système. En particulier, si le système possède une chaîne minimale (MPS) avec peu d'éléments, l'amélioration de cette chaîne minimale peut accroître la fiabilité de nombreuses coupes minimales (MCS). Tout algorithme permettant de calculer les MCS peut également être utilisé pour calculer les MPS. Pour ce faire, l'arbre de défaillance est remplacé par son dual: les portes "ET" sont remplacées par des portes "OU", les portes "OU" par des portes "ET", les portes de vote " k/N " par des portes de vote " $(N-k)/N$ ", et les événements de base (BE's) par leur complément (c'est-à-dire "défaillance du composant" par "absence de défaillance du composant"). Les MCS de cet arbre dual sont les MPS de l'arbre de défaillance originale [Kvassay et al., 2016].

7.1.3 Défaillances de cause commune (CCF)

Un autre aspect qualitatif est l'analyse des défaillances de cause commune probables (common cause failures-CCF). Il s'agit de défaillances distinctes qui peuvent survenir en raison d'une cause commune qui n'est pas encore répertoriée dans l'arbre de défaillance. Par exemple, si un composant peut être remplacé par une pièce de rechange pour éviter une défaillance, ce composant et sa pièce de rechange se trouvent dans une même coupe. Si la pièce de rechange est produite par le même fabricant que le composant, un défaut de fabrication partagé pourrait entraîner une défaillance simultanée des deux. Si de telles causes communes sont jugées trop probables, elles devraient être modélisées explicitement pour éviter de surestimer la fiabilité du système [Ruijters and Stoelinga, 2015].

7.2 Analyse quantitative

Les méthodes d'analyse quantitative des arbres de défaillance permettent d'obtenir des valeurs numériques pertinentes pour leurs évaluations. Les mesures stochastiques sont largement util-

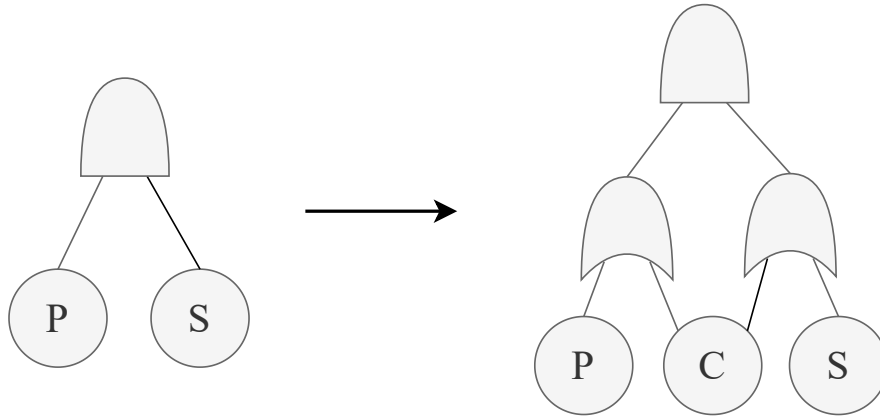


Figure 2.9 Exemple d'arbre de défaillance montrant l'ajout de la cause commune C aux événements P et S

isées car elles fournissent des informations utiles telles que les probabilités de défaillance. Les mesures d'importance indiquent l'importance d'un ensemble de composants pour la fiabilité du système. De plus, la sensibilité de ces mesures aux variations des probabilités des événements de base est importante.

La section suivante décrit d'abord quelques éléments de base de la théorie des probabilités, puis fournit des définitions et des techniques d'analyse pour plusieurs mesures applicables aux arbres de défaillance.

7.2.1 Modélisation des probabilités de défaillance

Les arbres de défaillance à temps continu prennent en compte l'évolution temporelle des défaillances du système. Le comportement de défaillance des composants est généralement défini par une fonction de probabilité $P : R^+ \rightarrow \{1\}$ qui, pour chaque événement de base (BE_i) et instant t , donne la probabilité que BE_i n'ait pas défailli à l'instant t .

En pratique, les distributions de défaillance peuvent souvent être approximées de manière adéquate par des distributions exponentielles inverses, et les événements de bases (BE_i) sont spécifiés avec un taux de défaillance $R : BE \rightarrow R^+$, tel que [Ruijters and Stoelinga, 2015] :

$$R_{BE_i} = \lambda \quad (2.32)$$

Et

$$P_{BE_i}(t) = 1 - \exp(-\lambda t) \quad (2.33)$$

7.2.2 Modélisation Bayésienne

Les réseaux bayésiens (RB) sont de plus en plus utilisés pour la construction de modèles de fiabilité des systèmes, la gestion des risques et l'analyse de la sécurité, en se basant sur des connaissances probabilistes et incertaines. Les RB sont des graphes orientés acycliques, dans lesquels les nœuds représentent des variables, les arcs indiquent des relations causales directes

entre les nœuds liés, et les tables de probabilités conditionnelles attribuées aux nœuds spécifient l'intensité de l'influence mutuelle entre les nœuds liés.

Les réseaux bayésiens (RB) tirent parti du critère de d-séparation et de la règle de chaîne pour effectuer une analyse quantitative. Sur la base des critères de d-séparation, tous les nœuds racines sont conditionnellement indépendants, tandis que les autres nœuds dépendent conditionnellement uniquement de leurs parents directs.

Deux variables distinctes A et B dans un réseau causal sont dites "d-séparées" si, pour tous les chemins entre A et B , il existe une variable intermédiaire V (distincte de A et B) telle que :

- La connexion est sérielle ou divergente, et V est instanciée,
- Ou la connexion est convergente, et ni V ni aucun des descendants de V n'ont reçu d'évidence.

Selon l'indépendance conditionnelle et la règle de chaîne, les réseaux bayésiens représentent la distribution de probabilité conjointe $P(U)$ des variables $U = \{A_1, A_2, \dots, A_n\}$ incluses dans le réseau par :

$$P(U) = \prod_{i=1}^n P(A_i | Pa(A_i)) \quad (2.34)$$

- $Pa(A_i)$ désigne les parents du nœud A_i dans le réseau bayésien;
- $P(U)$ la propriété du réseau bayésien.

L'application principale des RB dans l'analyse des accidents réside dans leur capacité à servir de moteur d'inférence pour actualiser la probabilité a priori d'occurrence d'événements, compte tenu de nouvelles informations, appelées "évidence" " e ".

Ces nouvelles informations sont généralement des données opérationnelles, incluant l'occurrence ou la non-occurrence de l'accident ou d'événements primaires:

$$\begin{aligned} P(U|e) &= \frac{P(U, e)}{P(e)} \\ &= \frac{P(U, e)}{\sum_U P(U, e)} \end{aligned} \quad (2.35)$$

L'équation 2.35 peut être utilisée soit pour la prédiction de probabilités, soit pour la mise à jour de probabilités. Dans l'analyse prédictive, les probabilités conditionnelles de la forme $P(\text{Accident} | \text{Evènement})$ sont calculées, indiquant la probabilité d'occurrence d'un accident particulier compte tenu de l'occurrence ou de la non-occurrence d'un certain événement primaire. En revanche, dans l'analyse de mise à jour, celles de la forme $P(\text{Evènement} | \text{Accident})$ sont évaluées, montrant la probabilité d'occurrence d'un événement particulier compte tenu de l'occurrence d'un certain accident.

Soit A un parent de B . En utilisant le calcul des probabilités, il serait naturel de considérer $P(B|A)$ comme la force du lien. Cependant, si C est également un parent de B , alors les deux probabilités conditionnelles $P(B|A)$ et $P(B|C)$ ne donnent à elles seules aucune indication sur la manière dont les impacts de A et C interagissent. Ils peuvent coopérer ou se contrecarrer de diverses manières, de sorte que nous avons besoin d'une spécification de $P(B|A, C)$.

Il peut arriver que le domaine à modéliser contienne des boucles de rétroaction (voir Figure 2.10). Les boucles de rétroaction sont difficiles à modéliser quantitativement (c'est un exemple de ce que sont les équations différentielles). En ce qui concerne les réseaux causaux, aucun calcul n'a été développé qui puisse prendre en compte les boucles de rétroaction. Par conséquent, nous exigeons que le réseau ne contienne pas de cycles.

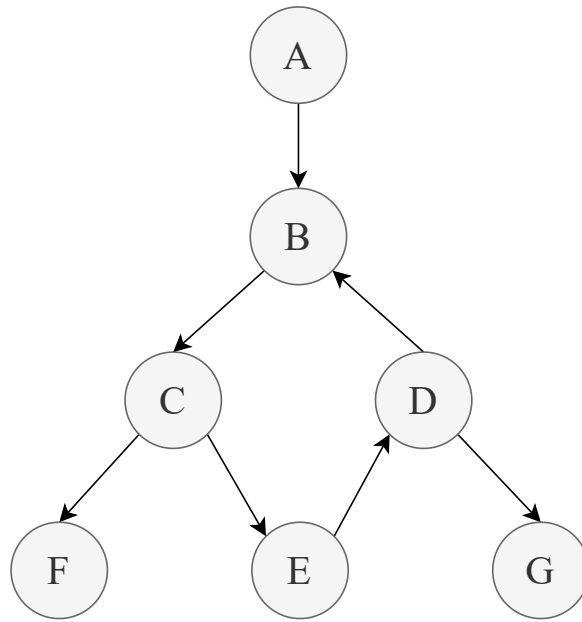


Figure 2.10 | Un graphe orienté avec une boucle de rétroaction. Ceci n'est pas autorisé dans les réseaux bayésiens

Un réseau bayésien se compose des éléments suivants :

- Un ensemble de variables ou nœuds et un ensemble d'arcs orientées entre les variables.
- Chaque variable ou nœud possède un ensemble fini d'états mutuellement exclusifs.
- Les variables, ainsi que les arcs orientées, forment un graphe orienté acyclique (directed acyclic graph-DAG). (Un graphe orienté est acyclique s'il n'existe pas de chemin orienté $A_1 \rightarrow A_n$ tel que $A_1 = A_n$).
- À chaque variable A ayant pour parents $B_1, B_2, \dots, B_n$, est associée la table de probabilité $P(A|B_1, B_2, \dots, B_n)$

Notons que si A n'a pas de parents, alors la table se réduit à des probabilités inconditionnelles $P(A)$. Pour le graphe orienté acyclique de la Figure 2.11, les probabilités a priori $P(A)$ et $P(B)$ doivent être spécifiées [Kjaerulff and Madsen, 2008].

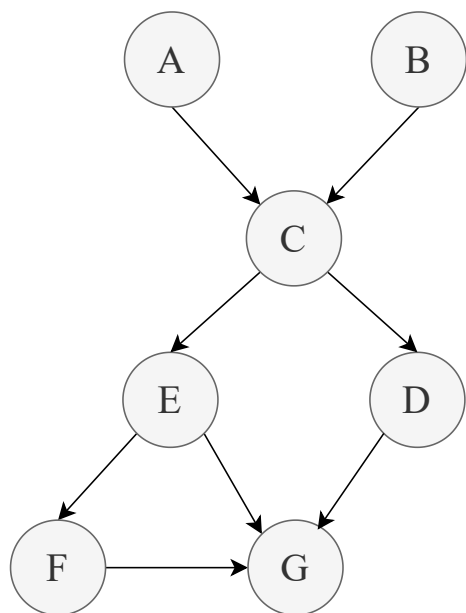


Figure 2.11 | Un graphe orienté acyclique (DAG). Les probabilités à spécifier sont: $P(A)$, $P(B)$, $P(C|A,B)$, $P(E|C)$, $P(D|C)$, $P(F|E)$, $P(G|D,E,F)$

7.2.3 Passage des arbres de défaillance aux réseaux bayésiens

Comme expliqué précédemment, un réseau bayésien (RB) est un modèle graphique probabiliste qui représente un ensemble de variables aléatoires et leurs dépendances conditionnelles via un graphe orienté acyclique (DAG). Chaque nœud du DAG correspond à une variable, et les arcs représentent les relations probabilistes directes entre les nœuds connectés. Cette structure permet de représenter des connaissances sur un domaine incertain et de raisonner de manière probabiliste face à l'incertitude.

Dans la littérature, il est noté que les RB offrent un haut niveau de flexibilité par rapport aux arbres de défaillance (ADD) traditionnels [Yazdi et al., 2019, Yazdi, 2019, Zerrouki and Tamrabet, 2015], en terme de:

- **Flexibilité:** Les RB sont plus flexibles que les ADD, permettant de substituer un ADD par un RB dans les procédures d'évaluation des risques. Cette flexibilité provient de la capacité des RB à modéliser des relations complexes.
- **Données éparées:** L'approche classique de l'ADD est mal adaptée aux situations où les données empiriques pour l'estimation des paramètres sont rares, conduisant à des intervalles de confiance larges. Les RB peuvent incorporer une variété d'informations, au-delà des données statistiques, grâce au théorème de Bayes.
- **Variabilité dynamique:** Les RB peuvent gérer la variabilité dynamique, une lacune de la méthode classique des ADD. Ils illustrent les relations causales entre les facteurs clés et les résultats dans un système.
- **Mise à jour des probabilités:** Les réseaux bayésiens (RB) se distinguent par leur capacité à actualiser les connaissances sur le risque d'accident. Ils exploitent un

mécanisme de mise à jour des probabilités, alimenté par le savoir d'experts et par l'intégration d'informations issues du retour d'expérience (incidents, quasi-accidents, etc.). Cette approche permet de raffiner les probabilités a priori et de mieux maîtriser l'incertitude associée à la survenue d'un accident.

- Applications: Les RB sont largement utilisés dans divers domaines tels que les statistiques, l'apprentissage automatique, l'intelligence artificielle, et l'analyse de risque et de fiabilité. Ils peuvent améliorer la performance de sécurité d'un système, mettre à jour la probabilité de défaillance.

Le transfert d'un ADD vers un RB comme illustré en figure 2.12, ou la construction directe d'un RB, implique la définition des nœuds (variables) et des arcs (relations probabilistes). Les arcs sont orientés du nœud "parent" (cause) vers le nœud "enfant" (effet), fournissant une représentation compacte des distributions de probabilité conjointes. Lors de la conversion graphique, les événements de base, les événements intermédiaires et l'événement de tête de l'arbre de défaillance sont respectivement représentés comme des nœuds racines, des nœuds intermédiaires et le nœud terminal dans le réseau bayésien correspondant. Les nœuds d'un réseau bayésien sont connectés de la même manière que les composants correspondants dans l'arbre de défaillance. Lors de la conversion numérique, les probabilités d'occurrence des événements de base sont affectées aux nœuds racines correspondants en tant que probabilités a priori. Pour chaque nœud intermédiaire ainsi que pour le nœud terminal, une table de probabilités conditionnelles (TPC) est élaborée. Les TPC sont élaborées en fonction du type de porte logique. La figure 2.13, illustre la procédure graphique et numérique simplifiée de conversion des arbres de défaillance en réseaux bayésiens [Yazdi et al., 2019, Yazdi, 2019, Zerrouki and Tamrabet, 2015].

7.2.4 Analyse de la disponibilité du système

La disponibilité d'un système est la probabilité que le système soit fonctionnel à un moment donné. La disponibilité peut également être calculée sur un intervalle, où elle désigne la fraction de cet intervalle pendant laquelle le système est opérationnel. La disponibilité est particulièrement pertinente pour les systèmes réparables, car elle inclut le fait que le système peut redevenir fonctionnel après une défaillance. Pour les systèmes non réparables, la disponibilité sur une durée donnée peut néanmoins être utile. La disponibilité à long terme tend toujours vers 0 pour les systèmes non réparables non triviaux, car finalement certaines coupes échoueront et resteront non fonctionnelles [Ruijters and Stoelinga, 2015].

Étant donné que la disponibilité à un instant spécifique est une simple probabilité, il est possible de traiter l'arbre de défaillance en temps réel comme un ADD à un seul instant, en remplaçant la distribution de défaillance des événements de base par la probabilité d'être dans un état de défaillance au moment désiré. La fiabilité à un seul instant de l'ADD résultant est alors la disponibilité de l'original. La disponibilité à long terme d'un système peut être calculée de la même manière, à condition que la disponibilité limite de chaque BE existe. La disponibilité sur un intervalle ne peut pas être calculée aussi facilement. Puisque cette disponibilité est définie comme une intégrale sur une expression arbitraire, aucune expression de forme fermée n'existe dans le cas général [Ruijters and Stoelinga, 2015].

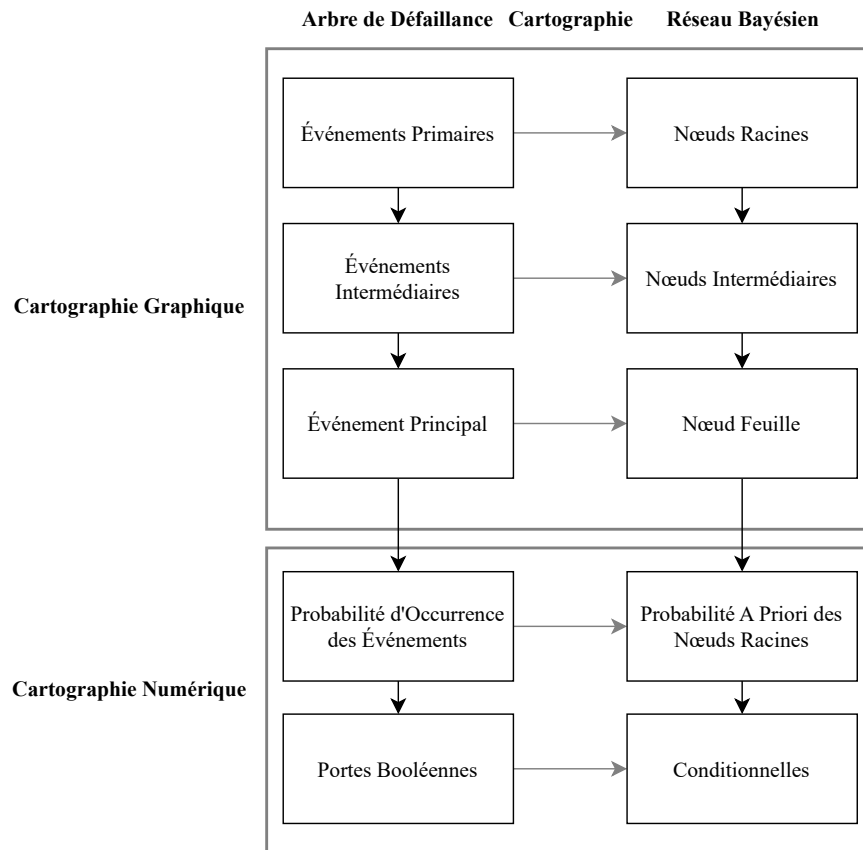


Figure 2.12 | Cartographie de l'ADD vers le RB (Réseau Bayésien)

7.2.5 Mesures d'importance

Pour améliorer la fiabilité d'un système, il est essentiel d'identifier les éléments qui contribuent le plus à sa performance globale. L'analyse des arbres de défaillance permet de déterminer l'importance relative des coupes minimales et des composants individuels. Les mesures d'importance issues de l'ADD offrent une approche quantitative pour identifier les zones nécessitant une réduction des risques. En classant les événements en fonction de leur impact sur le système, il devient possible de cibler les améliorations qui auront le plus grand effet sur la disponibilité et la fiabilité. Cette approche ciblée aide à identifier les faiblesses dans la conception du système et à optimiser les ressources pour un impact maximal.

Il existe un certain nombre de mesures quantitatives d'importance qui peuvent être calculées si des données de fréquence ou de probabilité sont disponibles. Il s'agit notamment du critère de Birnbaum, qui est la réduction progressive de la probabilité de l'événement principal lorsque la probabilité de l'événement primaire est réduite progressivement, et du critère de Vesely-Fussell, qui est la probabilité qu'un ensemble de coupes contenant l'événement primaire se soit produit, étant donné que l'événement principal s'est produit [Lees, 2012].

(a) Importance marginale (Birnbaum):

Cette mesure détermine l'augmentation maximale du risque lorsqu'un composant

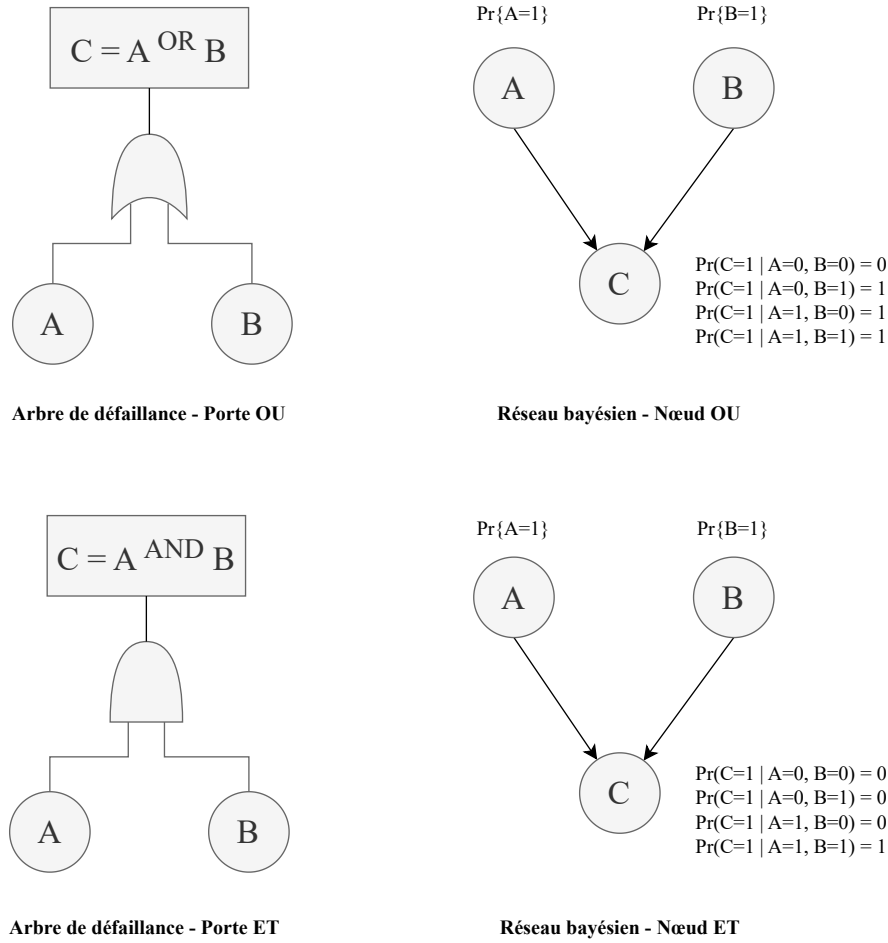


Figure 2.13 Exemple de portes "ET" et "OU" dans la conversion de l'ADD en réseau Bayésien [Bobbio et al., 2001]

échoue par rapport à son fonctionnement normal. La mesure de criticité pour le composant ou le facteur d'importance marginal (FIM), parfois connu sous le nom de facteur de Birnbaum pour un composant i à un instant t dans un système S comportant n composants, est défini comme suit [Guetarni, 2019]:

$$I_i^B(t) = p_{(s|i)}(t) - p_{(s|\bar{i})}(t) \quad (2.36)$$

$$I_i^{CR}(t) = \frac{p_i(t)}{p_s(t)} \times I_i^B(t) \quad \text{for } i = 1, 2, \dots, n \quad (2.37)$$

où,

- $p_{(s|i)}(t)$: Probabilité conditionnelle de défaillance du système étant donné que le composant i est défaillant.
- $p_{(s|\bar{i})}(t)$: Probabilité conditionnelle de défaillance du système, étant donné que le composant i est en état de fonctionnement.

- $I_i^{CR}(t)$: est le facteur de Birnbaum pour un composant i .
- $p_i(t)$ et $p_s(t)$: sont les probabilités que le composant i est critique et défaillant à l'instant t au moment où S est assurément défaillant à l'instant t .

(b) **Importance de Fussell-Vesely:**

Le facteur d'importance de Vesely-Fussell $VFF(i)$ représente la proportion de l'indisponibilité globale du système qui est attribuable aux scénarios où le composant i est en état de défaillance. Mathématiquement, $VFF(i)$ est exprimé par la probabilité conditionnelle [Laitonen and Niemelä, 2014]:

$$P(i \in S | P(S) = 1) \quad (2.38)$$

où,

- $i \in S$ indique que le composant i appartient à l'ensemble des coupes minimales S .
- $P(S) = 1$ signifie que le système est en état de défaillance.

8 Conclusion

Ce chapitre a exploré de manière approfondie l'analyse des risques industriels, en détaillant les différentes étapes et méthodes utilisées pour identifier, évaluer et maîtriser les dangers liés aux installations industrielles. Après avoir présenté les fondements de la gestion des risques, nous avons examiné les principales approches d'analyse, qu'elles soient qualitatives ou quantitatives, statiques ou dynamiques. Les méthodes classiques comme l'APR, l'HAZOP, l'AMDEC ou encore les arbres de défaillance et d'événements ont été abordées, tout comme les outils plus avancés, notamment les réseaux bayésiens et la modélisation probabiliste. L'intégration de ces approches permet une meilleure prise en compte de l'incertitude et une fiabilisation accrue des décisions en matière de sécurité. Enfin, la mise en relation des arbres de défaillance avec les réseaux bayésiens offre des perspectives intéressantes pour une analyse dynamique des risques. Ainsi, l'approche globale et systématique développée dans ce chapitre constitue un cadre essentiel pour renforcer la sûreté des installations industrielles et prévenir les accidents majeurs.

CHAPITRE 3

Incertitude et importance des données dans le domaine de la gestion des risques

1 Introduction

Au fil des ans, plusieurs méthodes ont été établies pour l'analyse et l'estimation des risques dans différentes industries, jouant un rôle significatif dans l'amélioration de la performance de sécurité des systèmes. L'analyse par arbre de défaillance est l'une des approches les plus largement utilisées. Comme pour d'autres méthodes, l'incertitude est une composante inévitable de toute technique d'analyse des risques, particulièrement dans les méthodes probabilistes où elle constitue un élément clé de la description du risque qui est souvent défini comme la combinaison de la probabilité d'un résultat indésirable et incertain, et de la gravité de ce résultat. Pour réaliser une arbre de défaillance appropriée, des entrées probabilistes telles que les probabilités de défaillance des événements de base sont nécessaires. Il est souvent difficile d'obtenir une probabilité précise pour la survenue d'un événement de base. L'incertitude et l'ambiguïté réside dans la complexité et de la variabilité du comportement du système, de la rareté des données quantitatives sur différents paramètres du système, et de l'implication humaine dans les processus d'analyse, d'opération et de prise de décision.

La gestion de l'incertitude est un domaine de recherche en plein croissances dans l'analyse et l'estimation des risques, qu'elles soient qualitatives ou quantitatives. Diverses stratégies, comme la théorie des probabilités, la théorie des ensembles flous, et le théorème de Bayes, etc sont employées pour traiter l'incertitude des données. Ce chapitre examine l'état de l'art de ces stratégies, en se concentrant sur leur application dans l'analyse des risques basée sur l'arbre de défaillance, et en analysant différentes approches méthodologiques.

2 Incertitudes inhérentes à l'analyse par arbre de défaillance

2.1 Sources d'incertitudes et leurs impacts

Le terme incertitude est appliqué de diverses manières dans différents domaines tels que l'ingénierie, la philosophie, les sciences et l'économie. L'incertitude est définie par le Conseil national de la recherche des États-Unis [Council et al., 2009] comme : "le manque ou l'incomplétude d'information. L'évaluation quantitative de l'incertitude tente d'analyser et de décrire le degré auquel une valeur calculée peut différer de la valeur réelle. Elle utilise parfois des distributions de probabilité. L'incertitude dépend de la qualité, de la quantité et de la pertinence des données, ainsi que de la fiabilité et de la pertinence des modèles et des hypothèses".

À titre d'exemple d'incertitude, lors des premières phases de conception, un analyste peut être incertain quant au taux de défaillance d'un composant nouveau ou partiellement défini. De plus, l'incertitude traduit un manque de connaissance ; par exemple, nous savons généralement qu'un produit chimique est toxique, mais nous connaissons moins bien les effets qu'il pourrait avoir s'il était libéré à de faibles concentrations dans l'environnement.

Parmi les différentes méthodes d'analyse probabiliste des risques, l'analyse par arbre de défaillance (ADD) est l'approche la plus largement utilisée pour l'évaluation de la sécurité et de la fiabilité des systèmes. En utilisant l'ADD, il est possible de déterminer la probabilité de tout événement indésirable (événement au sommet), étant donné la probabilité des événements de base, qui sont les causes des événements de plus bas niveau. Il est donc nécessaire de quantifier la probabilité de défaillance de chaque événement de base afin de pouvoir mesurer la probabilité de l'événement au sommet.

Pour obtenir la probabilité de défaillance d'un événement, il est nécessaire de connaître les données relatives aux taux d'événements. Ils sont généralement exprimés en termes de fréquences ou de temps moyen avant défaillance (MTTF). Deux types de données relatives aux taux de défaillance sont généralement utilisés : ceux liés au temps et ceux liés à la demande. Les taux de défaillance liés au temps sont établis pour les équipements qui sont utilisés en continu, tandis que les taux de défaillance liés à la demande concernent les équipements qui sont normalement inactifs et qui doivent fonctionner sur demande [Lees, 2012].

Les données de défaillance peuvent être obtenues à partir de sources externes telles que la littérature et les banques de données. Elles peuvent également être collectées en interne, une entreprise possède un accès privilégié aux données de défaillance de ses propres installations, contrairement aux tiers, sauf si ces données sont partagées via une base de données publique comme le OREDA "Offshore Reliability Data Handbook", un manuel qui couvre les données de fiabilité d'une large gamme d'équipements utilisés dans l'exploration et la production de pétrole et de gaz [Lees, 2012].

Les taux de défaillance dépendent de nombreux facteurs, notamment de la fonction de l'équipement dans le système, de l'environnement du processus et des pratiques de maintenance, ainsi que du type d'équipement et de son fabricant.

Il existe plusieurs d'autres bases de données utilisées pour obtenir les données de fiabilité disponibles de chaque événement de base (taux de défaillance), notamment les bases de données de fiabilité génériques telles que, WOAD (Worldwide Offshore Accident Database), MARS (the European Union Major Accident Reporting System), PSID (Process Safety Incident Database), et autres [Lees, 2012].

La crédibilité des résultats de l'analyse des risques basée sur l'analyse par arbre de défaillance peut être compromise en raison de la présence des incertitudes. Par exemple [Lees, 2012]:

- En raison d'un manque de connaissance du système étudié;
- L'imprécision et l'incomplétude, peuvent affecter les paramètres d'entrée de l'ADD (par exemple, les données de taux de défaillance)
- L'hypothèse d'indépendance des événements de l'ADD, souvent irréaliste dans les systèmes complexes, introduit des incertitudes significatives dans les données et la modélisation, compromettant potentiellement la fiabilité de l'analyse des risques.
- La structure logique des ADD, qui repose sur l'utilisation de portes ET/OU, est déterminée par des intervenants humains. Cela ouvre la possibilité d'introduire des erreurs structurelles, ce qui peut engendrer une incertitude dans le modèle

Toutes ces incertitudes peuvent se propager des niveaux inférieurs de l'arbre de défaillance vers les niveaux supérieurs, affectant ainsi la fiabilité de l'analyse. Dans cette étude, nous nous intéressons spécifiquement au traitement de l'incertitude associée aux paramètres d'entrée de l'analyse par arbre de défaillance (ADD).

2.2 Classification des incertitudes dans le processus d'analyse des risques

Dans une procédure d'analyse des risques, deux principales perceptions de l'incertitude sont distinguées : l'incertitude liée à la variabilité physique et l'incertitude liée aux limitations des connaissances des experts du système.

La première catégorie correspond à l'incertitude objective, communément appelée « incertitude aléatoire ». Elle décrit l'incertitude inhérente au comportement aléatoire de nombreux processus physiques, tels que l'imprévisibilité des conditions météorologiques ou la survenue de pannes matérielles spécifiques dues à l'usure. L'incertitude aléatoire est également connue sous les termes d'incertitude accidentelle, incertitude caractéristique, ou encore incertitude intolérable et insurmontable. Ce type d'incertitude se manifeste lorsqu'un même expérimentateur répète une expérience sous des conditions identiques, mais obtient néanmoins des résultats différents à chaque essai. Une certaine part d'incertitude objective est inévitable et ne peut jamais être totalement éliminée d'un modèle ; tout au plus peut-elle être réduite.

La seconde catégorie correspond à l'incertitude liée au manque de connaissances ou à la subjectivité, généralement désignée sous le terme « d'incertitude épistémique ». Elle est associée à l'indécision, à l'ambiguïté ou à l'imprécision concernant la qualité d'une technique d'évaluation des risques. Contrairement à l'incertitude aléatoire, l'incertitude épistémique peut être atténuée avec le temps, à mesure que les décideurs acquièrent de nouvelles connaissances [Yazdi et al., 2019].

Ferson et Ginzburg [Ferson and Ginzburg, 1996] proposent un exemple illustrant les différences entre l'incertitude aléatoire et l'incertitude épistémique. Dans le cadre d'une évaluation du risque de disparition d'une espèce de chouette en voie de disparition, différentes questions ont été posées, chacune illustrant une forme distincte d'incertitude.

Par exemple, la question « Les mécanismes de mortalité changent-ils d'une saison à l'autre ? » représente l'incertitude aléatoire, liée à la variabilité sous-jacente de la situation étudiée.

Étant donné que les conditions météorologiques saisonnières et leurs effets sur les chouettes sont imprévisibles, il existe une incertitude inhérente dans la détermination du taux de mortalité de ces oiseaux. Dans ce cas, l'incertitude est due à la variabilité temporelle — les données évoluant au fil du temps — mais elle peut également résulter d'autres formes de variabilité, comme la variabilité spatiale (variation des données en fonction du lieu) ou la variabilité au sein de la population (variation des données d'un individu à l'autre).

En revanche, la question « Quel est le nombre de chouettes présentes dans la forêt ? » illustre l'incertitude épistémique, découlant de notre connaissance imparfaite et incomplète de la situation étudiée. En effet, bien qu'il existe un nombre fixe et défini de chouettes dans la forêt à un instant donné, nous ne connaissons pas nécessairement ce nombre en raison de la difficulté à suivre chaque individu. Cependant, contrairement à l'incertitude aléatoire, l'incertitude épistémique peut être réduite par des études complémentaires, par exemple en utilisant des mécanismes améliorés de suivi des populations de chouettes.

Dans le domaine de l'analyse des risques liées au phénomène de fuite de gaz, considérons la question : « À quelle fréquence une fuite de gaz inflammable peut-elle se produire dans une unité de traitement ? » Cette incertitude est aléatoire, car elle est liée à la variabilité intrinsèque des phénomènes physiques et aux événements aléatoires, tels que les défaillances imprévisibles d'équipements, les variations de pression dans les conduites ou les conditions météorologiques extrêmes favorisant la dispersion du gaz, et autres. La probabilité d'une fuite peut être estimée statistiquement, mais elle ne peut pas être éliminée, car elle résulte de processus aléatoires et incontrôlables.

En revanche, la question « Quelle est la concentration exacte de gaz inflammable dans l'atmosphère après une fuite ? » relève de l'incertitude épistémique. Cette incertitude est due au manque de connaissance sur certains paramètres du système, tels que l'efficacité des détecteurs de gaz, la précision des modèles de dispersion atmosphérique, ou encore la fiabilité des données historiques sur les fuites précédentes. Contrairement à l'incertitude aléatoire, elle peut être réduite grâce à des études approfondies, une meilleure instrumentation et l'amélioration des méthodes de surveillance et de modélisation.

Ainsi, bien que l'incertitude aléatoire soit inévitable et liée à la nature aléatoire des événements, l'incertitude épistémique peut être atténuée par l'amélioration des connaissances et des outils d'analyse des risques industriels.

3 Gestion avancée de l'incertitude dans l'analyse des risques des réservoirs par l'arbre de défaillance

L'analyse de fiabilité des système par arbres de défaillances (ADD) a été appliquée aux réservoirs de stockage des hydrocarbures, car il s'agit d'une technique largement utilisée pour identifier les événements de base (BE) et estimer la probabilité de défaillance de l'événement critique. Par conséquent, pour mesurer la probabilité de ce dernier, il est nécessaire de quantifier la probabilité de défaillance de chaque BE. Bien que certaines études et bases de données fournissent des probabilités exactes pour des événements de base particuliers, il peut être difficile de représenter avec précision les probabilités des événements de base dans les scénarios du monde réel en raison du manque de données historiques et de la connaissance incomplète [Guo et al., 2021]. Cependant, l'incertitude est une partie incontournable de toute méthode d'analyse des risques, en particulier des méthodes probabilistes telles que l'ADD, en raison d'un manque de compréhension

des systèmes étudiés, de la complexité des systèmes et de l'incomplétude et de l'imprécision des paramètres utilisés, tels que les données de taux de défaillance. Pour surmonter ce problème, certains chercheurs ont proposé avec succès des techniques et des stratégies telles que la théorie de l'évidence, la théorie des ensembles flous, les réseaux bayésiens et autres pour faire face à l'incomplétude ou aux pénuries de données afin d'améliorer la capacité des ADD des réservoirs de stockage.

En 2019, une étude pertinente a été développée pour présenter les progrès dans la gestion de l'incertitude dans l'analyse des risques basée sur l'ADD [Yazdi et al., 2019]. L'étude a conclu que les stratégies d'intégration, en particulier celles impliquant la logique floue, les réseaux bayésiens et la théorie de l'évidence, peuvent considérablement améliorer l'efficacité des méthodes d'analyse des risques probabilistes dans la gestion de l'incertitude. Ces approches intégrées se sont avérées plus polyvalentes et applicables dans divers scénarios, car elles intègrent des processus d'évaluation linguistique, suivent des mécanismes de mise à jour et s'adaptent bien à différentes conditions.

Les études sur la logique floue avancée pour la gestion des incertitudes dans l'analyse des risques des réservoirs de stockage pétrolier ont examiné l'efficacité de ces techniques pour atténuer l'impact des données incertaines. Une approche combinant la théorie des ensembles flous et l'analyse par arbre de défaillance a été utilisée pour évaluer la probabilité d'incendie et d'explosion des réservoirs de pétrole brut (COTFE), en traitant les ambiguïtés des données de défaillance. L'analyse d'importance a permis de repérer les points faibles du système pour la prise de décision [Wang et al., 2013].

Le jugement d'experts et la logique floue ont été utilisés pour évaluer l'arbre de défaillance d'incendie de la Syrian Company for Oil Transport (SCOT). La méthode proposée élimine l'opinion unique d'un expert qui ne se situe pas dans l'intervalle suggéré par les opinions des autres experts. La probabilité de l'événement critique a ensuite été calculée et comparée avec la probabilité moyenne mondiale de COTFE. Une analyse de l'importance des événements de bases (BEs) et des ensembles de coupe minimales (MCSs) a également été réalisée dans cette étude [Halloul et al., 2019].

Une méthode de prise de décision qui repose sur une structure hiérarchique (Analytic Hierarchy Process-AHP), basé sur l'élucidation des experts et la théorie des ensembles flous, est proposée pour l'analyse des arbres de défaillance afin d'évaluer les accidents impliquant des incendies et des explosions dans les réservoirs de stockage de pétrole en acier. Une analyse d'importance et de sensibilité a été réalisée pour identifier les événements de bases les plus critiques, nécessitant une attention particulière afin de prévenir les incendies et explosions dans les réservoirs de pétrole [Shi et al., 2014]. La probabilité de défaillance de l'événement critique a été calculée en utilisant la théorie des ensembles flous pour l'analyse des arbres de défaillance ainsi que pour le processus hiérarchique d'analyse conventionnel (AHP)[Yazdi, 2017]. Une nouvelle méthode d'analyse des arbres de défaillance floue a été développée en utilisant une méthode d'agrégation par similarité basée sur un intervalle de α -cut, afin d'évaluer la probabilité de défaillance des risques de libération de gaz chloré dans l'industrie Chlor-Alkali, lorsque les données historiques quantitatives de défaillance des composants du système sont indisponibles ou insuffisantes [Kumar and Singh, 2022]. Afin de gérer l'incertitude résultant de l'absence d'informations complètes et d'améliorer la fiabilité du jugement qualitatif des experts, les concepts de Z-nombres et de la théorie des ensembles flous sont combinés avec l'analyse des arbres de défaillance pour analyser de manière exhaustive les risques liés à la santé et à la

sécurité des mines en ce qui concerne les machines/équipements, l'environnement et le lieu de travail [Jiskani et al., 2022].

Les chercheurs ont également examiné l'efficacité de l'utilisation des techniques de réseaux bayésiens pour traiter l'incertitude des données dans l'analyse des risques des réservoirs de stockage de pétrole. Un réseau bayésien flou pour un réservoir de stockage d'éthylène a été développé pour l'analyse dynamique de la sécurité des systèmes de production [Rostamabadi et al., 2020]. Un modèle hybride d'arbre de défaillance et réseau bayésien flou basé sur la $t - Norme$ la plus faible Tw a été utilisé pour obtenir des probabilités a priori mis à jour des événements de bases et des événements critiques afin d'améliorer la fiabilité du système et de réduire les dommages causés par les fuites de pétrole et de gaz dans les pipelines sous-marins [Singh et al., 2022].

Les recherches mentionnées ci-dessus mettent en évidence diverses techniques utilisées pour traiter l'incertitude dans l'analyse des risques basée sur l'arbre de défaillance des réservoirs de stockage. Cependant, une limitation commune de ces techniques est l'absence de prise en compte de leur impact sur l'analyse des conséquences, notamment en ce qui concerne l'environnement. C'est dans ce contexte que s'inscrit notre étude

4 Gestion de l'incertitude à travers les approches avancées

Pour surmonter les limitations d'incertitude des données, diverses méthodes ont été développées et intégrées à l'ADD, notamment le jugement d'expert, la logique floue, les réseaux bayésiens et les méthodes d'aide à la décision multicritère. Ces approches permettent de mieux quantifier l'incertitude et d'améliorer la fiabilité des techniques d'analyse des risques.

4.1 Jugement d'experts

Dans le cadre de l'analyse des risques, l'obtention de données précises sur la fréquence ou la probabilité d'événements peut s'avérer difficile. Une approche couramment employée pour pallier ce manque est le recours au jugement d'expert, notamment dans l'estimation des taux d'erreur humaine et des taux de défaillance des équipements.

Le jugement d'expert est particulièrement utile pour :

- Estimer des phénomènes nouveaux, rares ou complexes ;
- Prédire des événements futurs ;
- Intégrer et interpréter des données existantes ;
- Comprendre les processus décisionnels individuels ou collectifs ;
- Identifier les connaissances établies et les lacunes dans un domaine [Evans et al., 1994].

Plusieurs références fournissent des cadres méthodologiques pour structurer et analyser ce type d'élicitation comme ceux définis dans [Meyer and Booker, 2001, Mosleh et al., 1987].

Dans le cadre du jugement d'expert, la résolution d'un problème repose sur plusieurs étapes :

- Compréhension de la question

- Récupération des informations pertinentes
- Formulation d'un jugement
- Communication d'une réponse

L'obtention de jugements d'experts repose sur un processus structuré d'élicitation, où la qualité des résultats dépend en grande partie de la formulation des questions posées. Ce processus commence par la définition claire des objectifs du projet, suivie de l'identification des domaines d'interrogation pertinents et de la sélection des experts.

Une fois les domaines de questionnement définis, une structuration rigoureuse des questions permet d'optimiser leur clarté et leur acceptabilité auprès des experts. L'affinement des questions vise à réduire les ambiguïtés et à limiter les risques de mauvaise interprétation. Pour cela, plusieurs techniques peuvent être utilisées, telles que la décomposition, qui consiste à diviser une question complexe en plusieurs sous-questions plus précises, ou encore l'utilisation d'aides visuelles comme des schémas et des diagrammes pour faciliter la compréhension.

La sélection des experts est un élément important dans diverses applications, notamment lorsqu'il s'agit d'obtenir des réponses d'experts ou de comprendre leur processus de résolution de problèmes. Dans la plupart des cas, ce sont les réponses des experts qui sont recherchées.

Deux types d'expertise sont distingués : l'expertise substantielle, qui correspond à l'expérience de l'expert dans un domaine spécifique, et l'expertise normative, qui concerne la connaissance par l'expert du mode de réponse requis, par exemple, sous forme de probabilités ou de classements.

La sollicitation de plusieurs experts diversifiés est recommandée pour éviter l'influence excessive d'un seul individu. Le nombre d'experts idéal se situe généralement entre cinq et neuf. La diversité des experts permet de garantir des résultats plus fiables et représentatifs, tout en évitant la surreprésentation de tendances particulières [Lees, 2012].

4.2 Distribution de probabilité

L'évaluation probabiliste des défaillances systémiques dans les analyses de risques repose fréquemment sur des modèles paramétriques, avec un intérêt particulier pour les distributions log-normales et normales. Cette modélisation est essentielle dans les analyses par arbre de défaillance, où la quantification des probabilités d'événements de bases nécessite une approche rigoureuse.

La distribution log-normale s'applique typiquement aux phénomènes de dégradation mécanique (usure, fatigue) où les temps de défaillance présentent une asymétrie positive. À l'inverse, la distribution normale devient pertinente lorsque les estimations expertes agrègent suffisamment de composants ($\geq 14/39$), validant l'approximation centrale par convergence asymptotique [Igalens and Joras, 2017].

L'étude citée implémente un protocole en deux phases, premièrement l'expert fournit une estimation médiane et subjective pour la fréquence de défaillance. Deuxièmement, la probabilité que la valeur réelle dépasse d'un ordre de grandeur cette médiane est quantifiée via une question de surprise relative.

Ce cadre opérationnalise la densité de probabilité $P(x, y)$, représentant la probabilité que la valeur réelle soit x , et que l'expert l'estime à y avec un écart-type σ pour l'ensemble des

événements de bases. L'expert peut être sujet à divers biais, mais dans le cas le plus simple, il est supposé non biaisé. Dans ce contexte, Cooke [Cooke, 1991] a supposé que si la valeur réelle est x et que l'expert donne un écart-type σ alors la probabilité qu'il estime x comme étant y est :

$$p(y | x, \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(y-x)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3.1)$$

L'analyse probabiliste établit que si un expert non biaisé modélise subjectivement des fréquences de défaillance selon une loi normale de moyenne y et de l'écart-type σ , alors la distribution des valeurs réelles de ces fréquences converge vers une loi normale identique $N(y, \sigma^2)$ pour un nombre suffisant d'observations [Cooke, 1991]. Cette relation s'exprime par :

$$p(x | y, \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x-y)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3.2)$$

La densité normale ne dépend que de la distance quadratique à la moyenne et de l'écart-type, ce qui implique :

$$p(x | y, \sigma) = p(y | x, \sigma) \quad (3.3)$$

4.3 Prise de décision multi-critère-MCDM

La prise de décision, en tant que processus mental complexe, est un programme de résolution de problèmes visant à déterminer un résultat souhaitable en tenant compte de différents aspects. Ce processus peut être rationnel ou irrationnel, et d'autre part, il peut utiliser des hypothèses implicites ou explicites influencées par plusieurs facteurs tels que le physiologique, le biologique, le culturel, le social, etc. Tous ces aspects, associés au niveau d'autorité et au niveau de risque, peuvent affecter le niveau de complexité du processus de prise de décision. De nos jours, les problèmes complexes de prise de décision peuvent être résolus en utilisant des équations mathématiques, des statistiques, des théories économiques et des dispositifs informatiques qui aident à calculer et estimer les solutions aux problèmes de décision de manière automatique [Taherdoost and Madanchian, 2023].

La prise de décision multi-critères (MCDM) ou l'analyse de décision multi-critères (MCDA) est l'une des méthodes les plus précises de prise de décision. L'une des premières études de recherche sur la prise de décision multi-critères a été développée par Benjamin Franklin lorsqu'il publia ses recherches sur le concept de l'algèbre morale. Plusieurs scientifiques empiriques et théoriques ont travaillé sur les méthodes MCDM pour examiner la capacité de modélisation mathématique de ces méthodes depuis les années 1950, afin de fournir un cadre qui puisse aider à structurer les problèmes de décision et à générer des préférences parmi les alternatives. MCDM comprend différentes méthodes qui diffèrent les uns des autres sous divers aspects, qui seront abordés dans les sections suivantes [Taherdoost and Madanchian, 2023, Hajduk, 2021].

Cette méthode considère différents critères qualitatifs et quantitatifs qui doivent être fixés pour trouver la meilleure solution. Par exemple, le coût ou le prix et la qualité des processus figurent parmi les critères les plus courants dans de nombreux problèmes de prise de décision. De plus, dans ces problèmes, des groupes d'experts attribuent différents poids aux critères en fonction de l'importance de chaque critère dans ce cas spécifique [Taherdoost and Madanchian, 2023].

Il existe plusieurs types de méthodes de prise de décision multi-critères (MCDM) qui ont été développées ou améliorées par différents auteurs au cours des dernières décennies. Les principales différences entre ces méthodes sont liées au niveau de complexité des algorithmes, aux méthodes de pondération des critères, à la manière de représenter les critères d'évaluation des préférences, à la possibilité de données incertaines et au type d'agrégation des données. Il existe différentes façons d'interpréter la résolution d'un problème de prise de décision multi-critères (MCDM). Le processus est considéré comme le choix de la meilleure (ou la plus préférée) alternative parmi un ensemble d'alternatives. Il peut également être expliqué comme un regroupement des alternatives (en plusieurs ensembles de préférences) et ensuite le choix d'un petit sous-ensemble parmi celles-ci. De plus, ces problèmes visent à définir les alternatives qui sont non dominées ou efficaces. Il n'est pas possible de passer d'une solution non dominée à une autre sans sacrifier au moins un des critères, ce qui permet aux décideurs de sélectionner un ensemble de solutions parmi l'ensemble des solutions non dominées [Aruldooss et al., 2013].

Sous une forme mathématique, un problème MCDM est défini comme suit [Taherdoost and Madanchian, 2023]:

$$A_i = \{A_i | i = 1, 2, 3, \dots, m\} \quad (3.4)$$

où, A est un ensemble distinct et fini d'alternatives, et m représente le nombre de ces alternatives.

$$C_j = \{C_j | j = 1, 2, 3, \dots, n\} \quad (3.5)$$

où, C est un ensemble de critères définis utilisés pour évaluer A , et n représente leur nombre. Les alternatives sont naturellement homogènes, mais ce point n'est pas nécessaire pour les critères. Autrement dit, les critères peuvent avoir des unités différentes sans interrelations, et avec des objectifs conflictuels (minimiser certains objectifs et maximiser d'autres).

$$W_j = \{W_j | j = 1, 2, 3, \dots, n\} \quad (3.6)$$

où, W est un ensemble de poids normalisés attribués à chaque critère en fonction de leur importance. La forme mathématique des ensembles discutés ci-dessus est une manière simple de définir un problème MCDM, et les informations obtenues sont généralement organisées sous forme de matrice, comme indiqué dans le tableau 4.4 qui représente la matrice des critères des experts, x_{ij} représente la valeur de A_i relative à C_j , et la matrice (M) ainsi que le vecteur des poids ($W = \{w_1, w_2, \dots, w_n\}$) constituent les données de base pour les problèmes de décision multicritère (MCDM). En effet, la méthode MCDM évalue les alternatives et les classe de la meilleure à la moins bonne.

Tableau 3.1 | Matrice des critères des experts et leurs poids calculés correspondants

	C_1	C_2	C_3	...	...	C_n
A_1	x_{11}	x_{12}	x_{13}	...	...	x_{1n}
A_2	x_{21}	x_{22}	x_{23}	...	...	x_{2n}
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\ddots$	$\vdots$	$\vdots$
A_m	x_{m1}	x_{m2}	...	...	...	x_{mn}

4.3.1 Processus hiérarchique analytique (AHP)

La méthode conventionnelle du Processus Analytique Hiérarchique (AHP) est largement utilisée pour résoudre des problèmes de prise de décision multicritères. Initialement introduite par Saaty en 1977, l'AHP permet de gérer la complexité des problèmes de décision en structurant les couches décisionnelles de manière hiérarchique [Saaty, 1980].

Un problème dans la prise de décision multi-critères basé sur Processus hiérarchique analytique (AHP) est décomposé en une structure hiérarchique représentée à la Figure 3.1. Il se compose de trois niveaux : l'objectif global (niveau supérieur), les critères de décision (niveau intermédiaire) et les alternatives possibles (niveau inférieur).

L'objectif global, représenté en vert, définit le but de la décision. Les critères de décision, en jaune, permettent d'évaluer les alternatives selon différentes perspectives et sont pondérés à l'aide de comparaisons par paires selon une échelle. Les alternatives, en rose, sont les choix possibles qui doivent être classés en fonction de leur pertinence par rapport aux critères. Les liens entre les niveaux montrent que chaque alternative est évaluée selon tous les critères [Saaty, 1980].

Dès que la hiérarchie est construite, les éléments de décision sont comparés par paires en fonction de leur importance par rapport à leur critère de contrôle. Plus précisément, les décideurs (DMs) sont invités à répondre à une série de comparaisons par paires dans lesquelles deux éléments à la fois sont comparés en fonction de leur contribution à leurs critères spécifiques du niveau supérieur. Les valeurs d'importance relative sont déterminées sur une échelle à 9 points, dite « Échelle Fondamentale de Saaty ». Les jugements numériques établis à chaque niveau de la hiérarchie forment des matrices par paires. Après la création des matrices de comparaison, les poids relatifs des éléments de chaque niveau par rapport à un élément du niveau supérieur adjacent sont calculés comme les composantes du vecteur propre normalisé associé à la plus grande valeur propre de leur matrice de comparaison [Saaty, 1980].

Cette méthode présente plusieurs avantages, notamment une structuration claire du problème, l'intégration de critères multiples et la prise en compte des jugements subjectifs. Toutefois, elle peut devenir complexe avec un grand nombre d'éléments et est sensible aux incohérences dans les comparaisons. Enfin, l'AHP standard est limité face aux incertitudes, nécessitant parfois des adaptations comme l'AHP flou [Saaty, 1980].

Tableau 3.2 | Variables linguistiques pour la comparaison par paires [Saaty, 1980]

Variable linguistique	Échelle floue triangulaire	Échelle réciproque triangulaire
Également fort	(1,1,1)	(1,1,1)
Modérément fort	(2,3,4)	$(\frac{1}{4}, \frac{1}{3}, \frac{1}{2})$
Fort	(4,5,6)	$(\frac{1}{6}, \frac{1}{5}, \frac{1}{4})$
Très fort	(6,7,8)	$(\frac{1}{8}, \frac{1}{7}, \frac{1}{6})$
Extrêmement fort	(9,9,9)	$(\frac{1}{9}, \frac{1}{9}, \frac{1}{9})$
Valeurs intermédiaires	(1,2,3)	$(\frac{1}{3}, \frac{1}{2}, 1)$
	(3,4,5)	$(\frac{1}{5}, \frac{1}{4}, \frac{1}{3})$
	(5,6,7)	$(\frac{1}{7}, \frac{1}{6}, \frac{1}{5})$
	(7,8,9)	$(\frac{1}{9}, \frac{1}{8}, \frac{1}{7})$

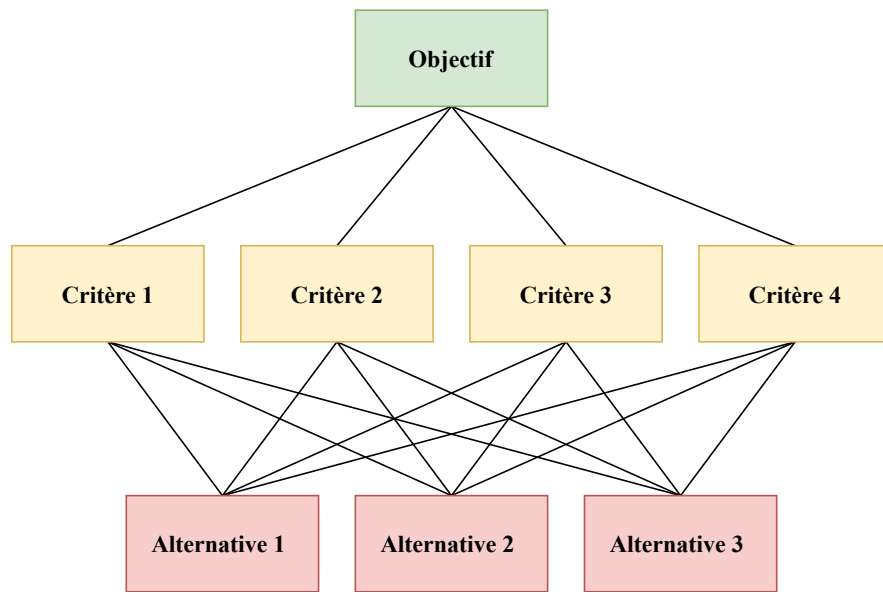


Figure 3.1 | Représentation schématique du processus AHP

4.3.2 Processus hiérarchique analytique flou (FAHP)

Le Processus Analytique Hiérarchique Flou (F-AHP) est une extension du Processus Analytique Hiérarchique (AHP) classique, qui intègre la théorie floue pour gérer les imprécisions et les incertitudes dans les jugements d'experts. Cette approche a été développée pour surmonter les limites de l'AHP, qui ne prend pas en compte l'imprécision des jugements humains [Yazdi, 2017].

L'AHP est une technique structurée pour organiser et analyser des décisions complexes, basée sur une hiérarchie de critères et d'alternatives. Cependant, il ne permet pas de gérer efficacement les incertitudes subjectives, ce qui peut affecter la fiabilité des résultats, et les décideurs trouvent généralement qu'il est plus sûr de fournir des jugements par intervalles que des jugements de valeurs fixes. Pour résoudre ce problème, des chercheurs comme Buckley [Buckley, 1985] et Chang [Chang, 1996] ont introduit des extensions majeures des techniques F-AHP en utilisant des fonctions d'appartenance triangulaires et trapézoïdales. Buckley a contribué en déterminant les priorités floues des ratios de comparaison, tandis que Chang a introduit une nouvelle méthode liée à l'utilisation de nombres triangulaires.

Dans cette étude, la méthode de Buckley est mise en œuvre pour déterminer les poids d'importance relatifs des critères et des alternatives. Cette approche est choisie pour sa capacité à gérer efficacement les incertitudes subjectives et à fournir des résultats plus fiables. En résumé, le F-AHP offre une approche robuste pour intégrer l'incertitude dans la prise de décision multicritères, en combinant la structure hiérarchique de l'AHP avec la flexibilité de la logique floue pour modéliser les jugements qualitatifs.

4.4 Réseau bayésien

Les réseaux bayésiens (RB) sont aujourd'hui largement reconnus pour leur flexibilité supérieure par rapport aux arbres de défaillance (ADD) dans les procédures d'analyse des risques. Ils sont notamment capables de mettre à jour dynamiquement les probabilités en intégrant de nouvelles

informations issues de l'expertise, ou d'événements observés au cours du cycle de vie des systèmes (accidents, incidents, quasi-accidents, dysfonctionnements) [Yazdi, 2019, Shan et al., 2017].

Les RB permettent une représentation graphique puissante, où les nœuds symbolisent des variables, les arcs traduisent des relations causales, et les tables de probabilités conditionnelles (TPC) encodent les dépendances entre variables. Cette structure est particulièrement adaptée à la modélisation des systèmes complexes soumis à des incertitudes.

Dans ce contexte, la transformation d'un ADD en réseau bayésien offre une alternative performante pour améliorer la précision de l'analyse. La Figure 3.2 illustre l'algorithme simplifié de cartographie du nœud papillon (BT) vers le réseau bayésien (BN), où tous les éléments d'un arbre de défaillance et d'un arbre d'événements sont convertis en un réseau équivalent [Yang et al., 2025].

Les événements de base (EB), intermédiaires (EI) et critiques (EC) sont respectivement traduits en nœuds racines, intermédiaires et pivots dans le RB. Les barrières de sécurité sont modélisées comme des nœuds spécifiques, avec deux états possibles : fiabilité ou défaillance. Quant aux conséquences des événements critiques, elles sont représentées par des nœuds de sortie dédiés. La TPC assignée à chaque nœud dépend du type de porte logique utilisé dans l'ADD.

La conversion de l'arbre d'événements repose notamment sur les travaux de Bearfield et Marsh [Bearfield and Marsh, 2005], qui ont démontré la pertinence de cette approche. Contrairement au BT, qui ne permet pas de modéliser l'influence de l'événement principal sur la probabilité de défaillance des barrières de sécurité, les RB permettent d'établir des arcs causaux explicites depuis l'événement principal vers ces barrières. Ainsi, la dépendance conditionnelle est correctement intégrée dans le modèle.

L'un des apports majeurs des RB est leur capacité à réduire l'incertitude, notamment par des mécanismes de mise à jour bayésienne. Cette mise à jour peut s'appuyer sur des données objectives (mesures, historiques) ou subjectives (jugement d'experts), ce qui permet une meilleure estimation de la probabilité des événements critiques. Depuis l'étude fondatrice de [Khakzad et al., 2011], de nombreux travaux ont poursuivi l'exploration de cette voie, en affinant les estimations à travers des modèles bayésiens dérivés d'ADD. La figure 3.3 illustre l'essor croissant des publications sur cette thématique.

Les RB ont été appliqués avec succès dans de nombreux domaines : fiabilité des systèmes complexes, ingénierie logicielle, infrastructures civiles, bioinformatique, épidémiologie, etc. [Nannapaneni et al., 2016]. Leur capacité à agréger des données incertaines et hétérogènes renforce leur pertinence dans des environnements industriels dynamiques.

L'intégration progressive des connaissances en phase d'exploitation permet également de réduire l'incertitude subjective. À ce titre, les RB se révèlent particulièrement adaptés à la modélisation dynamique des systèmes, contrairement aux approches classiques figées [Yazdi et al., 2019]. L'approche bayésienne, comme détaillée à la section , s'impose ainsi comme une solution robuste pour améliorer la précision des diagnostics de défaillance.

L'étude bibliométrique de [Amin et al., 2019] met en évidence l'essor de ce réseau : environ 38 % des recherches récentes combinent les RB avec des approches traditionnelles comme l'ADD. Le secteur chimique et pétrochimique concentre 62 % de ces travaux, suivi de l'industrie manufacturière (28 %). Entre 2015 et 2022, les publications associées aux RB et à la quantification

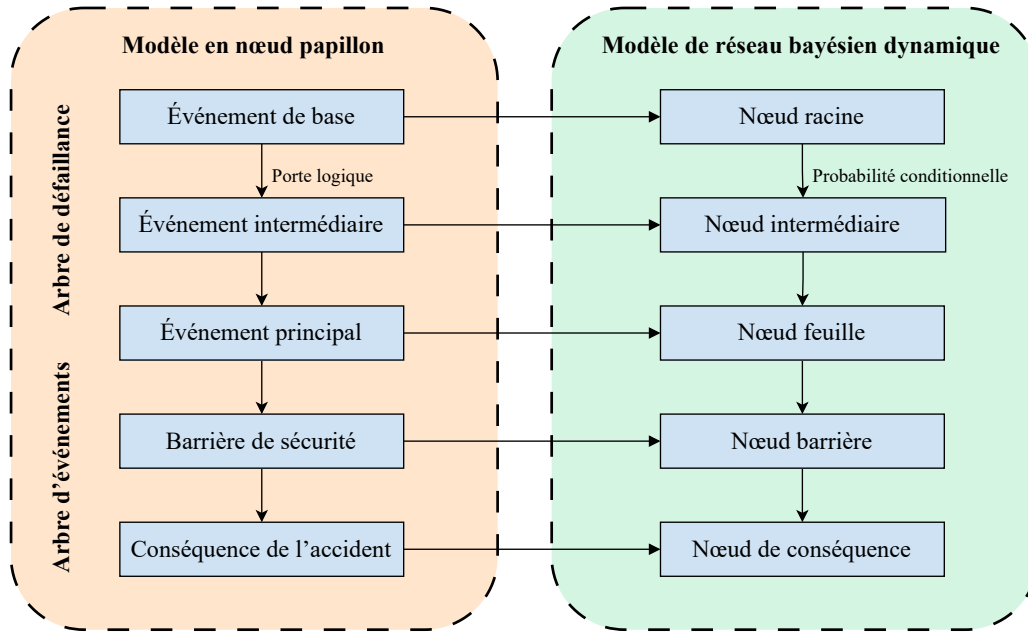


Figure 3.2 | Conversion du modèle nœud papillon en un réseau bayésien correspondant

de l'incertitude ont connu une croissance annuelle moyenne de 17 %.

Techniquement, les RB surpassent les méthodes classiques sur plusieurs aspects. Par exemple, leur couplage avec l'ADD permet de réduire les erreurs de prédiction de 40 %, d'améliorer la modélisation des interdépendances de 22 %, et d'atteindre une précision de classification des défauts de 89 % — soit une amélioration de 34 % par rapport aux arbres de décision — tout en diminuant le temps d'analyse de plus de moitié [Amin et al., 2019].

En matière de gestion des données incomplètes, les RB apportent également des bénéfices notables. Une étude menée sur 147 équipements industriels montre une réduction de 63 % de l'incertitude sur l'estimation du temps moyen entre pannes (MTBF), même avec seulement 30 % de données disponibles.

Cependant, certaines limites subsistent. La complexité de la modélisation — notamment la définition de topologies optimales pour des systèmes à plus de 50 composants — constitue un frein, mentionné dans 72 % des études. Par ailleurs, l'implémentation effective en environnement industriel reste rare (18 % des cas), en raison des temps de calcul élevés (latences > 5 secondes) et du manque de standards pour l'interopérabilité avec les systèmes SCADA. Enfin, les biais d'experts lors de l'assignation des probabilités a priori engendrent des erreurs systématiques estimées entre 12 et 15 % dans près de 70 % des modèles.

4.5 Théorie de la logique flou

La théorie des ensembles flous, introduite par Zadeh en 1965 [Zadeh, 1965], s'est imposée comme une alternative aux modèles probabilistes classiques jugés inadéquats pour représenter certains types d'incertitudes. Cette théorie étend les ensembles traditionnels en caractérisant l'appartenance partielle via une fonction $\mu : X \rightarrow [0, 1]$ permettant de modéliser des concepts linguistiques (comme "risque élevé" ou "performance moyenne") sous forme de nombres flous. Sa flexibilité

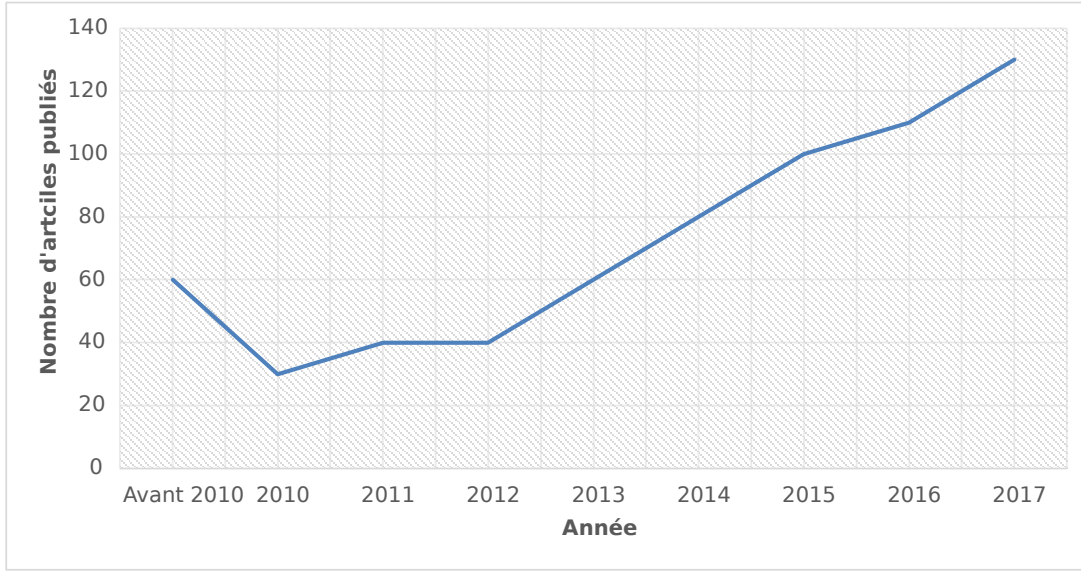


Figure 3.3 Répartition des publications sur l'utilisation des réseaux bayésiens dans le contexte de la sécurité

opérationnelle se manifeste notamment par la capacité à décrire des modificateurs sémantiques, des prédicats graduels et des quantificateurs flous, tout en intégrant des mécanismes d'agrégation d'expertise pour réduire les biais d'évaluation [Khan and Sadiq, 2005].

Les applications pratiques exploitent fréquemment des représentations numériques comme les nombres flous triangulaires ou trapézoïdaux, offrant un cadre formel pour traiter des phénomènes complexes où l'imprécision des données rend les approches booléennes inopérantes. Cette modélisation continue de l'incertitude, combinant rigueur mathématique et adaptabilité cognitive, trouve aujourd'hui des applications transversales en analyse de risques, classification automatisée et gestion de systèmes industriels critiques [Kabir et al., 2016].

Dans la littérature, de nombreuses études affirment que la logique floue repose sur le concept de degré d'appartenance partielle à un ensemble numérique. Cette appartenance est généralement décrite par une fonction d'appartenance et appartient à l'intervalle compris entre zéro et un comme indiquée dans la figure 3.4

Par exemple, un nombre flou triangulaire illustré dans la figure 3.5 est de forme simple et montre ainsi l'incertitude dans l'estimation de la probabilité d'un événement de base dans une analyse d'arbre de défaillance. Le vecteur flou $A = (P_L, P_m, P_U)$ représente respectivement les limites inférieure, la plus probable et supérieure. En utilisant l'équation Eq. 3.7, le degré d'appartenance de confiance peut être estimé à l'aide de méthodes de défuzzification (par exemple, la méthode du centre de l'aire) afin de mieux gérer l'incertitude.

$$U_A(x) = \begin{cases} 0 & \text{if } x < P_L \\ \frac{x - P_L}{P_m - P_L} & \text{if } P_L \leq x \leq P_m \\ \frac{P_U - x}{P_U - P_m} & \text{if } P_m < x \leq P_U \\ 0 & \text{if } x > P_U \end{cases} \quad (3.7)$$

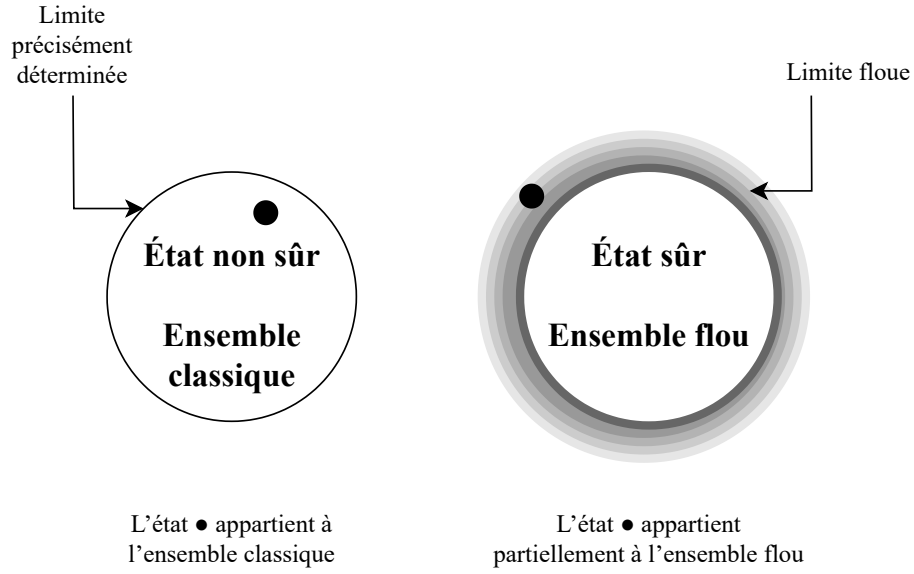


Figure 3.4 | Ensemble classique et ensemble flou pour les états sûr et non sûr

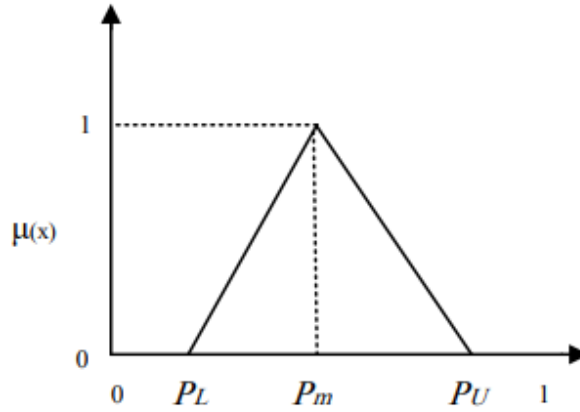


Figure 3.5 | Nombre flou triangulaire représentant l'estimation de la possibilité pour un événement d'entrée (comme un événement de base)

Où, X^* signifie que la sortie défuzzifiée, $U_A(x)$, est désignée comme une fonction d'appartenance, et x est considérée comme la variable de sortie.

$$X^* = \frac{\int u_i(x) x dx}{\int u_i(x) dx} \quad (3.8)$$

La logique floue permet de gérer l'incertitude subjective de différentes manières durant la procédure d'analyse des risques. La première approche est le processus d'élicitation subjective, cela implique que chaque expert consulté exprime son opinion sur la possibilité d'occurrence des événements de base dans un arbre de défaillance sous forme de termes qualitatifs. Ces termes

qualitatifs sont ensuite convertis en un ensemble de nombres flous. Par la suite, une procédure d'agrégation est appliquée dans l'environnement flou. Une méthode de défuzzification est alors utilisée pour aboutir à une valeur précise (dite crisp). Cependant, cette valeur précise repose sur la possibilité ; ainsi, en utilisant l'équation d'Onisawa [Onisawa, 1988], la possibilité peut être convertie en probabilité comme suit :

$$FP = \begin{cases} \frac{1}{10^k} & X^* \neq 0 \\ 0 & X^* = 0 \end{cases} \quad (3.9)$$

Et,

$$k = \left(\frac{1 - X^*}{X^*} \right)^{\frac{1}{3}} \times 2.301 \quad (3.10)$$

où la probabilité d'un événement d'entrée est notée par FP , et la possibilité précise (ou crisp) est identifiée par X^* .

La modélisation floue constitue une autre approche pour gérer l'incertitude liée aux variables d'entrée, telles que les événements de base. La structure fondamentale de la modélisation floue est illustrée dans la figure 3.6 et se compose des éléments suivants [Grisales Palacio, 2007]:

- Fuzzification : Ce processus convertit des données précises en données floues pour intégrer l'incertitude et les nuances qualitatives.;
- Moteur d'inférence : Il utilise des règles "si-alors" pour transformer les ensembles flous en sorties floues, basées sur des connaissances expertes.
- Défuzzification : Cette étape transforme les résultats flous en une valeur précise, en moyennant et en pondérant les différentes règles floues.

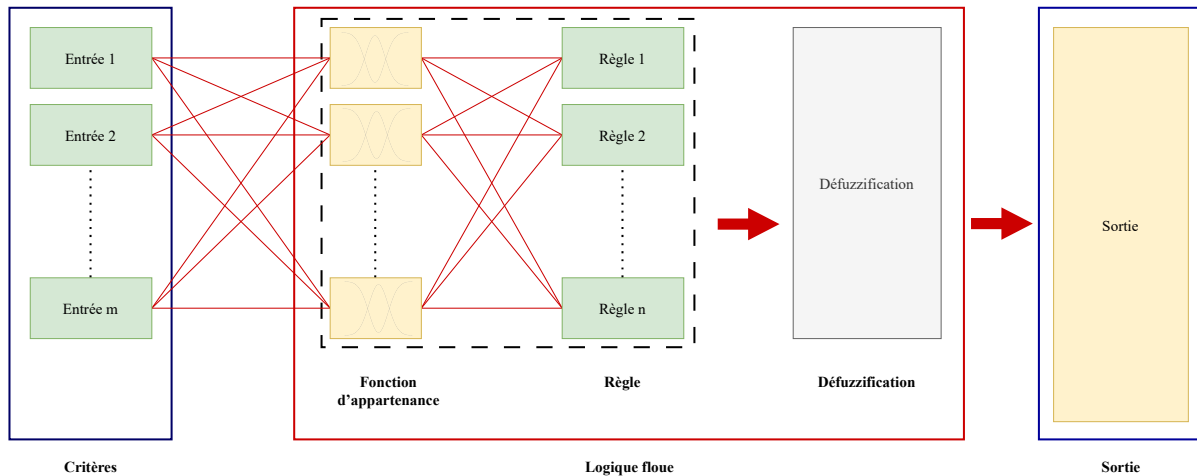


Figure 3.6 | Le cadre d'un système commun de modélisation floue

5 Conclusion

L'incertitude est un facteur déterminant dans l'analyse des risques, particulièrement dans l'évaluation de la fiabilité des systèmes industriels complexes. Cette incertitude est alimentée par la complexité et la variabilité du comportement des systèmes, la rareté des données quantitatives, et l'implication humaine dans les processus d'analyse et de prise de décision. Pour gérer ces incertitudes, plusieurs approches ont été développées, notamment l'utilisation du jugement d'experts, des distributions de probabilité, et des méthodes de prise de décision multicritères comme l'AHP et le FAHP. Les réseaux bayésiens et la théorie de la logique floue offrent également des cadres robustes pour modéliser et quantifier les incertitudes.

L'intégration de ces méthodes permet d'affiner l'analyse des risques et de renforcer la fiabilité des décisions prises. Une approche combinée de ces outils représente une perspective prometteuse pour l'optimisation des stratégies de gestion des risques, permettant ainsi des analyses plus précises et mieux adaptées aux environnements industriels dynamiques et incertains.

CHAPITRE 4

Étude de cas et méthodologie développée

1 Introduction

Ce chapitre présente une approche intégrée introduisant un cadre innovant et complet et présente une étude de cas sur l'analyse des risques d'un réservoir de condensat. La démarche débute par une phase d'identification exhaustive des risques, utilisant HAZOP et le nœud papillon basé sur MIMAH pour lister les causes potentielles menant aux scénarios critiques. Afin de gérer l'incertitude liée à la rareté des données, plusieurs techniques sont combinées : le jugement d'experts, la pondération de ces derniers à l'aide de méthodes avancées de décision multicritère (MCDM) — notamment la FAHP modifiée — et l'agrégation de leurs avis par des procédures fondées sur la logique floue. Le système est ensuite modélisé sous forme de réseau bayésien pour une analyse probabiliste. Enfin, des simulations permettent de prédire les impacts environnementaux potentiels et de délimiter les zones de menace. La méthodologie développée dans ce travail met en évidence les avantages d'une approche intégrée pour l'analyse des risques dans les systèmes complexes.

2 Présentation du cas d'étude

Les industries de processus chimiques contiennent un grand nombre de substances chimiques extrêmement inflammables, toxiques et/ou explosives, qui sont traitées et stockées dans une zone de processus dense. Selon les statistiques, les réservoirs de stockage représentent le troisième nombre le plus élevé d'accidents (14%) dans les processus chimiques, la majorité étant liée à des causes humaines et organisationnelles (33%) ainsi qu'à des problèmes de débit (14%), de transfert thermique (9%) et à des facteurs externes (8%) [Kidam and Hurme, 2013].

Le système choisi pour l'application de la méthodologie proposée dans notre recherche est un réservoir de stockage du condensat situé dans une usine de traitement de gaz naturel au sud de l'Algérie. Ce système est à toit fixe d'une capacité totale de 7990 m^3 , destiné à

conserver le condensat liquide à 40°C dans des conditions atmosphériques. La Figure 4.1 illustre le réservoir de stockage de condensat. Un schéma simplifié du processus est représenté dans la Figure 4.2.

Le réservoir de stockage de condensat est équipé des dispositifs de contrôle, de régulation et de sécurité suivants afin d'assurer sa sécurité : système de contrôle des processus (PCS), soupape de respiration (BV), indicateur de niveau et alarme haut/bas (LIAH/LIAL), indicateur de faible débit (FZL), indicateur de niveau bas/haut (LZL/LZH), système de torche, détecteurs de gaz, bassin de rétention, etc. Ce réservoir a donc été sélectionné pour la démonstration.

La décomposition du système d'étude en sous-unités fonctionnelles est une technique utilisée qui nous a permis de faciliter son analyse. En subdivisant le système complexe en éléments plus simples, il devient possible d'examiner et d'analyser les risques de manière plus structurée. Toutefois, une analyse complète nécessite également l'étude des interactions et des relations entre ces sous-unités afin de mieux comprendre le fonctionnement global du système.

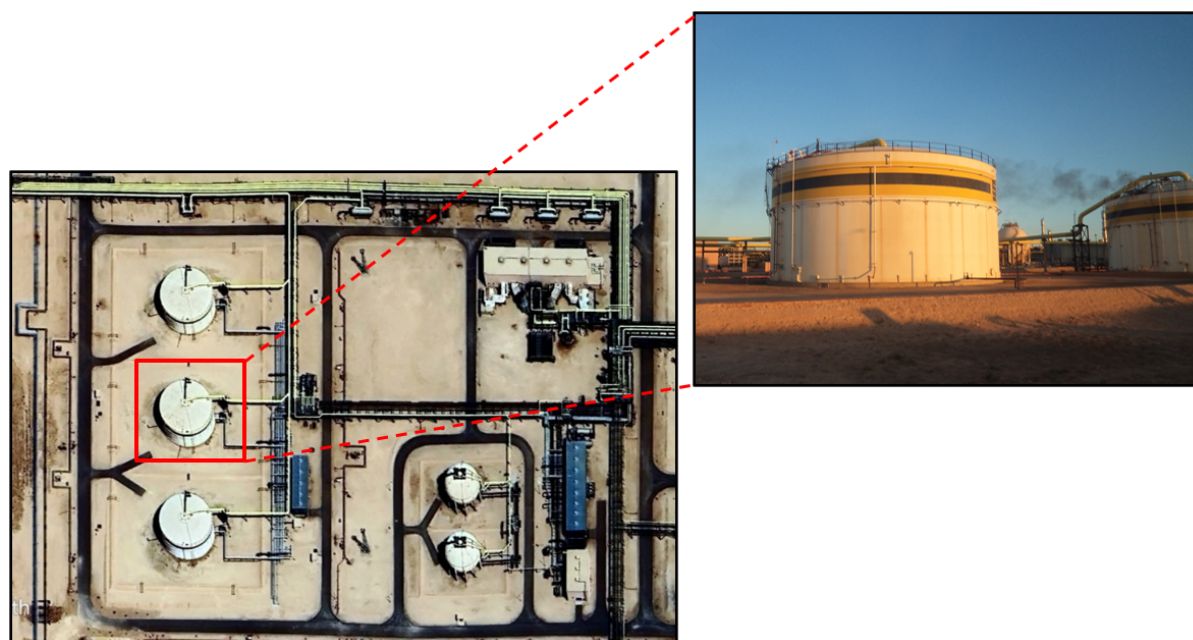


Figure 4.1 | Réservoir de stockage de condensat - Etude de cas

Tableau 4.1 | Paramètres du réservoir

Type	Réservoir à toit fixe
Substance	Condensat
Température de fonctionnement (°C)	40
Température de conception (°C)	-5 / +93,6
Pression de fonctionnement (bar)	0,002
Pression de conception (bar)	0,015
Volume (m³)	7990
Hauteur (m)	12,8
Diamètre (m)	28,2
Densité (kg/m³)	710

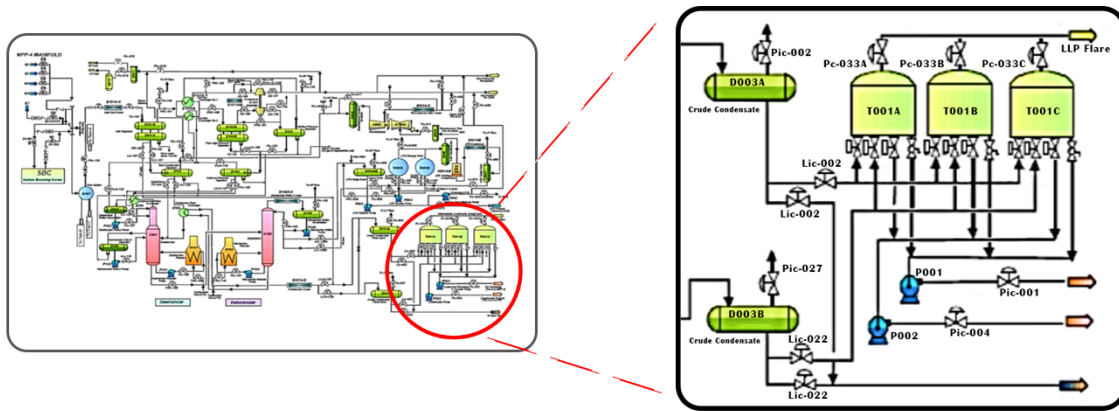


Figure 4.2 | Schéma de flux du processus

3 Méthodologie développée

3.1 Description

Le diagramme 4.3 illustre un cadre méthodologique rigoureux pour l'analyse et l'évaluation des risques, structuré en plusieurs phases interconnectées, appliqué dans le contexte d'une étude de cas spécifique. L'objectif est de fournir une analyse complète, allant de l'identification initiale des risques jusqu'à l'évaluation de leurs conséquences potentielles.

L'encadré en pointillés orange, intitulé "Identification des risques", représente la phase initiale du processus d'analyse. Cette phase se décompose en plusieurs étapes clés :

- Étude de cas: Le point de départ est une étude de cas ciblée. Cette étude fournit le contexte spécifique et les paramètres nécessaires pour l'ensemble de l'évaluation des risques. Elle permet de concentrer l'analyse sur un scénario concret et bien défini.
- HAZOP - Matrice de risques (a): L'identification des risques est principalement réalisée à travers une étude HAZOP (Hazard and Operability), combinée à une matrice de risques. L'étude HAZOP est une technique structurée et systématique qui vise à identifier les dangers potentiels et les problèmes d'opérabilité au sein du système ou du processus étudié. Elle repose sur l'examen méthodique des paramètres du processus et de leurs déviations potentielles. La matrice de risques est utilisée pour classer et hiérarchiser les risques identifiés en fonction de leur probabilité d'occurrence et de la gravité de leurs conséquences potentielles. Cela permet de concentrer les efforts sur les risques les plus critiques.
- Évaluation des risques et sélection des événements critiques: Une fois les risques identifiés, ils sont évalués afin de déterminer leur importance relative. Les événements critiques, qui représentent les risques les plus significatifs en termes de probabilité et de conséquences, sont sélectionnés pour une analyse plus approfondie dans les phases suivantes du processus.

L'encadré en pointillés bleus, désigné "Méthodologie MIMAH", englobe les étapes centrales de l'analyse des risques, en se basant sur la technique du nœud papillon (Bow-Tie) incluant l'arbre de défaillance et l'arbre d'événement.

- Construction de l'arbre de défaillance de l'événement critique: Un arbre de défaillance "ADD" est construit pour identifier et analyser les différentes combinaisons d'événements de base (défaillances de composants, erreurs humaines, facteurs environnementaux, etc.) qui peuvent mener à la survenue de l'événement critique. Pour ce faire, nous nous sommes appuyés sur la méthodologie MIMAH [Debray et al., 2004], qui propose une génération d'arbres de défaillance génériques. Cette approche a constitué un support de base essentiel, facilitant la complétude du modèle et l'identification rigoureuse des événements de base pertinents. En effet, les arbres génériques issus de MIMAH permettent d'établir une structure arborescente claire et normalisée des événements, en respectant les principes d'indépendance et de décomposition des événements élémentaires, ce qui a renforcé la cohérence et la précision de notre analyse.
- Construction de l'arbre d'événements de l'événement critique: Un arbre d'événements "ADE" est élaboré à partir de l'événement critique afin de décrire systématiquement les différentes séquences possibles, en tenant compte du fonctionnement ou de la défaillance des dispositifs de détection, d'alarme, de prévention, de protection ou d'intervention. Pour structurer et compléter cette construction, nous nous sommes appuyés sur les arbres d'événements génériques issus de la méthodologie MIMAH [Delvosalle et al., 2004a]. Cette approche fournit un cadre standardisé et exhaustif qui facilite l'identification et l'ordre chronologique des événements génériques, en prenant en compte les interactions fonctionnelles et temporelles entre les systèmes élémentaires.
- Création du diagramme nœud papillon (Bow-Tie): L'événement critique étant placé au centre du nœud papillon. En combinant l'arbre de défaillance (ADD), qui identifie et organise les événements de base à l'origine de l'événement critique, avec l'arbre d'événements (ADE), qui décrit les différentes séquences d'événements consécutifs, on construit un diagramme nœud papillon complet. Cette intégration permet de relier efficacement les scénarios de causes et de conséquences, facilitant ainsi la compréhension globale des risques.

Le diagramme en vert à la droite de la démarche se concentre sur la collecte des données nécessaires pour quantifier les risques identifiés et analysés précédemment. Elle se caractérise par les étapes suivantes :

- Collecte des taux de défaillance des événements de base: Une étape essentielle pour les événements de base identifiés dans l'arbre de défaillance. Ces événements de base peuvent représenter des défaillances de composants, des erreurs humaines, ou d'autres événements contribuant aux scénarios de risque. La quantification des risques dépend directement de la qualité et de la disponibilité de ces données.
- Détermination de la disponibilité des données historiques: Cette étape consiste à déterminer si des données historiques fiables sur les taux de défaillance sont disponibles pour les événements de base.
 1. Si des données historiques sont disponibles: La probabilité de défaillance est calculée à partir de ces données, en utilisant une distribution exponentielle.

Cette distribution est appropriée lorsque le taux de défaillance est considéré comme constant dans le temps.

2. Si les données sont rares ou inexistantes: En cas de manque de données historiques fiables, une méthode alternative est employée, désignée par : Jugement d'expert (EJ), Processus Hiérarchique Analytique Flou-FAHP et Processus Hiérarchique Analytique Flou Modifier M-FAHP, et Méthode d'Agrégation par Similarité (SAM). Cette méthode combine plusieurs approches pour estimer les probabilités de défaillance en s'appuyant sur le jugement d'experts :
 - Obtention de l'opinion d'experts sur la probabilité de défaillance à l'aide de variables linguistiques.
 - Conversion des variables linguistiques et agrégation des opinions des experts.
 - Défuzzification des opinions agrégées des experts en possibilités floues.
 - Conversion des possibilités floues en probabilités de défaillance.

Collecte des données sur les probabilités d'inflammation (diagramme vert à gauche de la démarche): des données spécifiques sur les probabilités d'inflammation sont collectées à l'aide de l'outil "Guide de la méthode MIMAH [Delvosalle et al., 2004d]", afin d'estimer le risque d'inflammation ou d'explosion de l'évènement critique de l'arbre de défaillance.

L'encadré en pointillés violet représente le calcul des paramètres de sécurité : une cartographe du modèle de diagramme Bow-Tie est convertie en un réseau bayésien à l'aide du logiciel AgenaRisk [AgenaRisk, 2025], et les probabilités de tous les niveaux du modèle sont calculés.

L'encadré en pointillés rose est dédié à la simulation des phénomènes dangereux: une simulation des conséquences potentielles des phénomènes dangereux (effets thermiques, surpressions et rejets atmosphériques) sont réalisées à l'aide du logiciel ALOHA [U.S. Environmental Protection Agency, 2025]. L'impact des événements dangereux est évalué, en tenant compte des résultats des simulations.

3.2 Objectif

L'objectif principal de cette démarche proposée est de développer un cadre méthodologique complet pour l'analyse des risques dans l'industrie pétrolière, en se concentrant spécifiquement sur les réservoirs de stockage et leur impact environnemental, dans notre cas il s'agit d'une application sur un bac de stockage du condensat. L'étude aborde les défis liés à la rareté des données historiques des défaillances des composantes de base en intégrant une approche hybride novatrice.

Cette approche intégrée consiste à incorporer la méthode du nœud papillon (Bow-Tie), basée sur la méthodologie MIMAH, dans le processus d'identification des risques pour les réservoirs de stockage. L'accent est mis sur l'identification des scénarios d'accidents les plus critiques et sur la liste de toutes les causes réalistes associées aux réservoirs, tout en surmontant les limites des données grâce à des méthodes établies telles que le FAHP modifié, la théorie des ensembles flous et le jugement des experts.

La transformation du modèle Bow-Tie en un réseau bayésien dynamique permet d'améliorer l'analyse des risques en intégrant un raisonnement probabiliste et en capturant les interactions dynamiques. L'étude utilise cette modélisation en réseaux bayésiens dynamiques pour proposer

des scénarios permettant d'évaluer les contributions des événements de base à l'événement critique et d'analyser les impacts environnementaux qui en résultent. En outre, elle prédit les zones de menace pour divers effets dangereux, offrant ainsi des informations précieuses pour l'évaluation des risques et la formulation de stratégies efficaces de réduction des risques.

L'originalité de cette recherche réside aussi dans l'utilisation d'une approche novatrice pour obtenir les probabilités de défaillance incertaines liées à toutes les causes réalistes identifiées par la technique du nœud papillon, basée sur la méthodologie MIMAH. Ces probabilités sont ensuite intégrées dans les analyses précédentes afin d'améliorer la précision et la robustesse des résultats. Le réservoir de condensat d'une entreprise algérienne a été choisi comme étude de cas pour illustrer l'application pratique de cette méthodologie.

4 Analyse semi-quantitative des risques

4.1 Identification des dangers, analyse et classement des risques

4.1.1 Méthode HAZOP

La méthode HAZOP (Hazard and Operability Study) est une technique systématique et formalisée visant à identifier les risques et les problèmes d'opérabilité associés à des installations ou des procédés industriels. Elle repose sur l'analyse des déviations par rapport aux intentions initiales du concepteur, permettant ainsi une évaluation approfondie de l'intégrité opérationnelle du système étudié. Ces déviations, appelées perturbations, peuvent survenir aussi bien lors des opérations normales ou de routine que pendant des phases spécifiques telles que le démarrage, l'arrêt ou les activités de maintenance.

L'objectif principal de la méthode HAZOP est d'identifier les problèmes potentiels liés aux déviations du procédé, sans toutefois chercher à les résoudre. Cette démarche s'appuie sur des sessions de réflexion structurées, durant lesquelles une équipe multidisciplinaire — composée notamment des ingénieurs du domaine travaillant dans le site de cas d'étude — examine systématiquement chaque composant du système.

Le caractère structuré et méthodique de la méthode HAZOP est assuré par l'examen détaillé des différentes lignes ou parties de l'installation. Pour chaque ligne, les intentions initiales du concepteur sont rappelées, puis les causes et conséquences des écarts à ces intentions sont analysées à l'aide de mots guides prédéfinis. Ces mots guides combinés aux paramètres du procédé servent à orienter la réflexion et à stimuler l'identification des risques potentiels. Dans le cadre de cette étude, les mots guides ainsi que les paramètres du procédé présentés dans le tableau 4.2 ont été utilisés [Dunjó et al., 2010].

Tableau 4.2 | Paramètres du procédé et types de déviations

Paramètres étudiés	Types de déviations
Débit	Absent, insuffisant, excessif
Niveau	Trop haut, trop bas
Température	Supérieure ou inférieure à la normale
Pression	Trop élevée, trop basse
Mélange / Composition	Mauvaise proportion, inversion
Temps / Séquencement	Retard, avance
Autres	...

possibles et les conséquences potentielles.

4.1.2 Matrice de risque

Après avoir identifié les dangers et les risques potentiels associés, une analyse approfondie des risques a été menée en considérant à la fois la probabilité d'occurrence et la gravité des conséquences. Cette évaluation s'appuie sur le principe de la matrice de risques comme illustré dans la figure 4.4, qui permet de classer la gravité des conséquences en fonction de leurs impacts sur les personnes, les biens et l'environnement, tandis que la probabilité est estimée en fonction de la fréquence de survenance annuelle.

L'objectif principal de cette démarche est de classer les risques identifiés par l'analyse HAZOP et de déterminer tous les scénarios majeurs et critiques liés au système étudié.

La matrice de risques utilisée dans cette recherche est celle développée par une entreprise pétrolière et gazière Algérienne, qui offre une méthode standardisée pour l'évaluation des risques [Det Norske Veritas, 2010]. Les classes de gravité et de probabilité associées à cette matrice sont décrites en détail dans les sections suivantes (voir tableau 4.3 et tableau 4.4).

Gravité	1				
	2				
	3				
	4				
		1	2	3	4
		Probabilité			

Figure 4.4 | Matrice de risque [Det Norske Veritas, 2010]

Tableau 4.3 | Échelle de probabilité [Det Norske Veritas, 2010]

Code	Description	Fréquence estimée
P4	Très probable : événement survenant fréquemment	Environ 1 fois/an
P3	Probable : déjà survenu, peut se produire durant la vie de l'installation	De 10^{-2} à 10^{-1} par an
P2	Peu probable : rencontré dans des organisations similaires	De 10^{-4} à 10^{-2} par an
P1	Improbable : jamais rencontré mais physiquement possible	$< 10^{-4}$ par an

Après l'évaluation des risques à l'aide de la matrice de risques, les risques identifiés sont classés en trois catégories distinctes : acceptable, ALARP (As Low As Reasonably Practicable), et inacceptable, tel qu'illustré à la Figure 4.5. La catégorie acceptable ne requiert aucune action immédiate, tandis que la catégorie ALARP nécessite l'implémentation d'efforts raisonnables

Tableau 4.4 | Échelle de gravité [Det Norske Veritas, 2010]

Gravité	Personnel	Environnement	Public	Production / Biens
G4	Plusieurs décès	Pollution hors limites de longue durée	Décès	Dommages importants et arrêt total de la production
G3	Incapacité permanente ou 1 décès	Dommages importants et arrêt total de la production	Blessures significatives	Dommages localisés et arrêt partiel de l'unité
G2	Blessures significatives	Pollution interne maîtrisée	Blessures mineures	Dommages mineurs et arrêt bref de la production
G1	Blessures mineures	Pollution mineure	Pas d'incidence	Pas de dommage, pas d'arrêt de production

Classification de risque	Description
	Acceptable
	ALARP – améliorable
	Inacceptable

Figure 4.5 | Niveau de risque [Det Norske Veritas, 2010]

pour minimiser davantage le risque. Inversement, la catégorie inacceptable exige l'application de mesures correctives immédiates afin de ramener le niveau de risque dans une plage tolérable.

4.2 Regroupements des risques basé sur la démarche MIMAH

La méthode MIMAH a pour objectif d'aider à une identification aussi exhaustive que possible des accidents susceptibles de survenir sur un site, et plus particulièrement pour un équipement spécifique. Pour ce faire, elle considère de manière systématique, pour chaque équipement critique, l'ensemble des événements physiquement envisageables, en négligeant l'action des éventuelles barrières de sécurité. L'objectif est de définir d'abord un ensemble complet de scénarios, parmi lesquels figurent les plus catastrophiques.

La méthode MIMAH repose sur une liste de types d'équipements associés aux événements critiques comme présenté dans le tableau 4.5 [Delvosalle et al., 2004c]. L'intégration de la méthodologie MIMAH se met en place à ce stade et cela après l'analyse HAZOP: les risques identifiés sont d'abord regroupés selon leurs effets, puis mis en correspondance avec les catégories d'événements critiques liées à l'équipement définies par MIMAH. Cette technique garantit une classification cohérente des scénarios de défaillance en combinant la rigueur de l'analyse HAZOP et le cadre standardisé de MIMAH garantissant ainsi une approche intégrée et harmonisée de l'analyse des risques.

Les événements critiques retenus pour notre cas d'étude de type réservoir de stockage atmosphérique, tels que définis par le guide MIMAH [Delvosalle et al., 2004c], sont présentés dans le tableau 4.5 ci-dessous, à savoir:

- EC5: Début d'un incendie;
- EC7: Rupture de l'enveloppe en phase liquide;
- EC8: Fuite d'un tuyau de liquide;

- EC10: Rupture catastrophique;
- EC11: Effondrement d'un réservoir;
- EC12: Effondrement du toit.

	EC1 Décomposition	EC2 Explosion	EC3 Mise en mouvement (air)	EC4 Mise en mouvement (liquide)	EC5 Début d'incendie	EC6 Rupture de l'enveloppe en phase vapeur	EC7 Rupture de l'enveloppe en phase liquide	EC8 Fuite d'un tuyau liquide	EC9 Fuite d'un tuyau gaz	EC10 Rupture catastrophique	EC11 Effondrement d'un réservoir	EC12 Effondrement du toit
EQ1 Stockage massif solide	X	X	X	X	X							
EQ2 Stockage de solides en petits emballages					X					X		
EQ3 Stockage de fluides en petits emballages					X	X	X			X		
EQ4 Stockage sous pression					X	X	X	X	X	X		
EQ5 Stockage matelassé					X		X	X		X	X	
EQ6 Stockage atmosphérique					X		X	X		X	X	X
EQ7 Stockage cryogénique					X	X	X	X	X	X	X	
EQ8 Équipement de transport sous pression					X	X	X	X	X	X		
EQ9 Équipement de transport atmosphérique					X		X	X		X	X	
EQ10 Tuyauterie					X			X	X			
EQ11 Équipement de stockage intermédiaire intégré au processus	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
EQ12 Équipement dédié à la séparation physique ou chimique des substances					X	X	X	X	X	X		
EQ13 Équipement impliquant des réactions chimiques					X	X	X	X	X	X		
EQ14 Équipement conçu pour la production et l'approvisionnement en énergie					X	X	X	X	X	X		
EQ15 Équipement d'emballage			X	X	X			X	X			
EQ16 Autres installations					X	X	X	X	X	X		

Tableau 4.5 | Tableau des équipements et des causes d'événements critiques [Delvosalle et al., 2004c]

Une fois tous les risques rattachés à leurs événements critiques respectifs, on réalise une sélection pour identifier celui présentant à la fois une gravité élevée des conséquences et un nombre important de causes potentielles (c'est-à-dire une probabilité de survenance élevée) selon la matrice de risque de la figure 4.4 . Cet événement critique, qui regroupe plusieurs scénarios de défaillance, est alors choisi pour faire l'objet d'une analyse approfondie.

5 Modèle Bow-tie issu de MIMAH : causes et conséquences

MIMAH est fondée sur l'élaboration de diagrammes en nœud papillon. Pour chaque système est associé un ensemble d'événements critiques. Pour chaque événement critique, un arbre des

défaillances est élaboré, puis un arbre des événements.

5.1 Développement de l'arbre de défaillance

Une fois l'événement critique identifié, on élabore son arbre de défaillance correspondant. Le guide MIMAH fournit [Debray et al., 2004], pour chaque événement critique, un ensemble des arbres de défaillance générique qui sert de base à la construction de la partie gauche du Bow-tie. Cet arbre est ensuite adapté aux caractéristiques spécifiques de l'équipement étudié : certaines branches sont ajoutées pour intégrer les causes révélées par l'étude HAZOP, d'autres sont supprimées si elles ne s'appliquent pas. Grâce à cette révision, l'arbre de défaillance final reflète de manière exhaustive et fidèle l'ensemble des causes potentielles du scénario critique.

5.2 Développement de l'arbre des événements

Une fois l'arbre de défaillance élaboré pour l'événement critique identifié, la méthodologie MIMAH prescrit le développement systématique de l'arbre des événements selon trois paramètres clés [Delvosalle et al., 2004a]:

- Typologie de l'équipement (réservoir, canalisation, systèmes de contrôle ou autres);
- Propriétés dangereuses intrinsèques de la substance (toxicité, inflammabilité, réactivité);
- État physique dominant (liquide, gaz, phase mixte)

Cette procédure normative de la méthode MIMAH, structure l'arbre des événements par couches successives, partant événement critique puis les événements critiques secondaires selon une logique descendante jusqu'à la matérialisation des phénomènes dangereux terminaux (événements majeurs). Cette approche permet de construire l'arbre des événements et de finaliser l'élaboration du modèle Bow-tie pour l'analyse des risques [Delvosalle et al., 2004a].

Les phénomènes dangereux issues de la méthodologie MIMAH sont Basée sur cinq types d'effets (radiation thermique, surpression, projectiles, effets des gaz toxiques et dommages environnementaux), elle catégorise 13 phénomènes dangereux comme suite [Delvosalle et al., 2004a] :

- Explosion d'un nuage de vapeur (VCE);
- Feu de nappe (poolfire);
- Feu de réservoir (tankfire);
- Feu en jet (jetfire);
- Feu instantané (flashfire);
- Nuage toxique (toxic cloud);
- Incendie (fire);
- Éjection de projectiles (missiles ejection);

- Génération de surpression (overpressure generation);
- Boule de feu (fireball);
- Dommages environnementaux (environmental damage);
- Explosion de poussières (dust explosion);
- Ébullition-violente (boilover);
- Feu de nappe résultant (resulting poolfire).

6 Analyse quantitative

Il est indispensable de procéder à une évaluation quantitative du modèle généré afin de calculer la probabilité d'occurrence de l'événement critique ainsi que la probabilité de survenance des phénomènes dangereux. Pour ce faire, il est nécessaire de connaître à l'avance les probabilités de défaillance des événements de base du modèle, qui constituent un point de départ. Ces événements correspondent aux défaillances des composants de niveau inférieur, combinées pour provoquer une défaillance du système de niveau supérieur. Cette approche permet d'évaluer la fiabilité globale du système en fonction des probabilités de défaillance de ses éléments constitutifs.

6.1 Traitement des données des événements de base disponibles

Dans l'analyse de la fiabilité des systèmes industriels, l'estimation des probabilités de défaillance des événements de base repose sur diverses sources de données. Ces probabilités peuvent être obtenues à partir de données historiques, de bases de données génériques ou de tests de fiabilité spécifiques.

Parmi les bases de données de référence utilisées dans notre étude, OREDA (Offshore Reliability Data) et CCPS (Guidelines for Process Equipment Reliability Data) [OREDA, 2002, CCPS, 1989], occupent une place prépondérante. OREDA fournit des informations détaillées sur la fiabilité des équipements utilisés dans l'industrie pétrolière et gazière offshore, tandis que CCPS est principalement consacré aux équipements des procédés chimiques. Ces bases de données offrent des valeurs standardisées des taux de défaillance et des temps moyens entre défaillances (MTBF), permettant ainsi une évaluation rigoureuse de la fiabilité des composants et des systèmes.

Par ailleurs, nous avons exploité les données historiques propres à l'entreprise, issues de ses systèmes de maintenance informatisés, pour enrichir notre analyse. Ces archives offrent une vision concrète des performances des équipements dans leurs conditions réelles d'exploitation. Les enregistrements de défaillances observées sur site ont ainsi permis d'ajuster finement nos modèles de fiabilité aux spécificités locales et d'accroître la pertinence de nos estimations.

La relation entre la probabilité de défaillance $P(EB)$ et le taux de défaillance λ , est exprimée par l'équation 4.1 suivante :

$$P(EB) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (4.1)$$

Cette équation est fondamentale pour établir un lien entre les mesures de fiabilité et les taux de défaillance, ce qui est essentiel pour l'analyse de la fiabilité des systèmes. Elle est largement

utilisée dans les modèles de fiabilité pour convertir les taux de défaillance en probabilités de défaillance, et vice versa.

6.2 Traitement des données des événements de base incertains

Par ailleurs, dans de nombreuses situations, il s'est avéré difficile d'estimer avec précision la fiabilité des composants de base — notamment leurs probabilités et taux de défaillance. Cette difficulté tient aux incertitudes et à l'incomplétude des données, à l'imprécision des inférences statistiques et au manque de connaissances spécifiques au système étudié dans les bases de données précédemment citées. Ces limites restreignent la pertinence d'une quantification rigoureuse du modèle.

Pour gérer ces incertitudes, plusieurs approches ont été explorées dans la littérature, notamment la théorie des ensembles flous, la théorie des probabilités, la théorie de l'évidence et le théorème de Bayes, entre autres.

Dans cette recherche, nous combinons le jugement d'experts, les méthodes analytiques hiérarchiques de décision et la théorie des ensembles flous pour estimer les taux de défaillance des événements de base. Cette démarche mixte permet d'affiner la précision des analyses de fiabilité dans un contexte d'incertitude et de données partielles.

6.2.1 Jugement d'experts

(a) Formulation du questionnaire

La formulation d'un questionnaire destiné à l'élicitation d'experts dans le domaine de la fiabilité des systèmes requiert une approche rigoureuse, particulièrement lorsque les données des événements de base sont incertaines. La qualité des résultats obtenus dépend en grande partie de la formulation et la clarté des questions.

Dans notre étude, nous avons personnellement élaboré un questionnaire d'élicitation d'experts en nous appuyant sur ces principes méthodologiques, afin de capter au mieux leur connaissance sur les taux de défaillance des événements de base incertains. Chaque question a été soigneusement rédigée pour répondre à un objectif précis et structurée de façon à :

- Focaliser l'attention de l'expert sur les données réellement nécessaires,
- Présenter l'enjeu dans un langage clair et immédiatement compréhensible,
- Garantir que la formulation soit perçue comme pertinente et légitime par les intervenants.

Pour ce faire, nous avons décomposé les objectifs globaux en domaines de questionnement (conditions climatiques, normes de construction, caractéristiques opérationnelles, etc.), puis décliné chacun d'eux en questions spécifiques. À chaque étape, nous avons testé et reformulé les items, tout en utilisant des supports visuels – comme le schéma explicatif de notre système d'étude pour aider l'expert à se projeter dans le contexte et à fournir des réponses plus précises et nuancées.

(b) Choix de l'échelle

Une fois le questionnaire relatif aux événements de base sélectionnés établi, une échelle de probabilité de survenue de leur défaillance leur est attribuée. Les experts

expriment alors leurs opinions en s'appuyant sur leur expérience et leurs connaissances, en utilisant des termes linguistiques. Ces derniers sont privilégiés, car ils sont plus intuitifs que les estimations numériques, souvent difficiles à obtenir et insuffisantes pour représenter fidèlement la situation. Les valeurs linguistiques sont introduites dans l'approche de fiabilité floue pour caractériser des phénomènes trop complexes ou mal définis. L'avantage de l'utilisation des valeurs linguistiques dans l'analyse de la sécurité des systèmes d'ingénierie est qu'elles permettent d'exprimer de manière intuitive et aisée les avis d'experts y compris celles qui ne se prêtent pas facilement à une quantification précise [Purba et al., 2014].

Les termes linguistiques retenus suivent une échelle de probabilité à sept degrés : très bas (TB), bas (B), assez bas (AB), moyen (M), assez élevé (AE), élevé (E), et très élevé (TE). Cette catégorisation a été choisie conformément à l'approche de Saaty comme représenté dans la figure 4.6, qui examine que la capacité moyenne de la mémoire humaine, estimée à sept plus ou moins deux. Cela signifie que entre cinq et neuf comparaisons sont appropriées pour servir de base à un jugement humain à un moment donné.

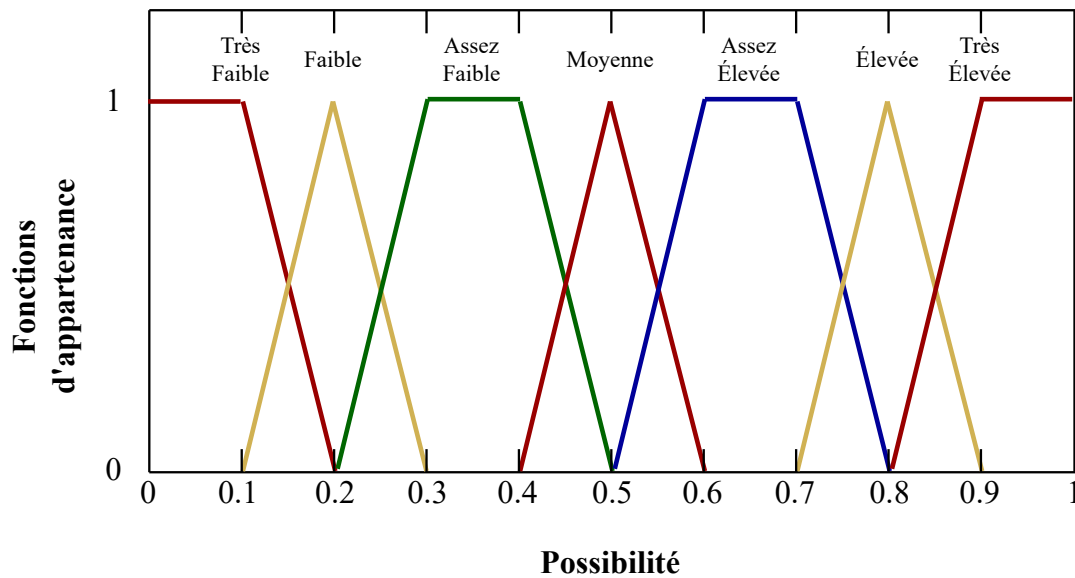


Figure 4.6 | Fonctions d'appartenance floues [Chen and Hwang, 1992]

(c) Sélection et sollicitation des experts

Nous avons directement sollicité nos experts par courriel pour qu'ils estiment, de manière qualitative et nuancée, la probabilité de défaillance de chacun des événements de base. Le choix des intervenants qu'ils soient ingénieurs internes ayant une connaissance fine de nos installations ou spécialistes externes reconnus dans le domaine a été déterminant : nous avons privilégié celles et ceux dont l'expertise technique et la crédibilité professionnelle garantissent la robustesse de nos résultats.

Conscients du biais que pourrait introduire un seul regard, nous avons constitué un panel pluridisciplinaire, rassemblant plusieurs personnalités aux compétences com-

plémentaires. Cette diversité d'expériences nous a permis de confronter les points de vue, de discuter des incertitudes et d'affiner collectivement chaque estimation. Au final, notre processus de sélection s'est apparenté à un véritable échantillonnage raisonné, visant à refléter au mieux la réalité opérationnelle tout en préservant l'objectivité de l'analyse.

(d) Conversion des termes linguistiques en nombres flous

Les termes linguistiques peuvent être représentés par différentes formes de fonctions d'appartenance, telles que des nombres flous et des distributions de possibilité (par exemple, uniforme ou normale). Comparés aux distributions de possibilité qui peuvent se traduire en distributions de probabilité, les nombres flous qui peuvent se traduire en probabilités floues nettes sont plus propices à une analyse quantitative de la fiabilité des systèmes [Guo et al., 2021].

Il existe de nombreuses applications de la théorie des ensembles flous pour traiter les incertitudes et l'inexactitude dans les jugements d'experts en termes linguistiques tels que les fonctions d'appartenance floue triangulaire, trapézoïdale, intuitionniste et gaussienne. Dans des études antérieures, les nombres flous triangulaires et trapézoïdaux se sont révélés efficaces pour l'évaluation des risques [Yazdi and Kabir, 2017]. Par conséquent, des nombres flous trapézoïdaux ont été utilisés dans cette étude pour associer les opinions linguistiques aux fonctions d'appartenance floues. Ces nombres flous ont été choisis en raison de leur capacité à représenter de manière précise et flexible l'incertitude et l'imprécision, couvrant ainsi un large éventail d'incertitudes. Définis par quatre paramètres, ils permettent une partie supérieure plate qui représente un intervalle de valeurs également possibles. Cette caractéristique rend les nombres flous trapézoïdaux particulièrement adaptés aux situations où les avis d'experts suggèrent une plage plus large de valeurs également probables, offrant ainsi une représentation plus complète de l'incertitude [Yazdi and Zarei, 2018].

À cet effet, dans l'étude de [Chen and Hwang, 1992], un système d'approximation numérique a été proposé afin de convertir les termes linguistiques en leurs nombres flous trapézoïdaux correspondants. L'approximation numérique des termes linguistiques est présentée dans le tableau 4.6.

Tableau 4.6 | Nombres flous correspondants aux termes linguistiques [Chen and Hwang, 1992]

Termes linguistiques	Nombres flous correspondants
Très faible (TF)	(0, 0, 0.1, 0.2)
Faible (F)	(0.1, 0.2, 0.2, 0.3)
Asser faible (AF)	(0.2, 0.3, 0.4, 0.5)
Moyenne (M)	(0.4, 0.5, 0.5, 0.6)
Asser élevée (AE)	(0.5, 0.6, 0.7, 0.8)
Élevée (E)	(0.7, 0.8, 0.8, 0.9)
Très élevée (TE)	(0.8, 0.9, 1, 1)

6.2.2 Pondération des experts

Le choix du système de pondération revêt une importance capitale, car il peut avoir une influence déterminante sur les résultats des probabilités de base. Parmi les approches disponibles, la pondération basée sur l'expertise est l'une des plus couramment utilisées : des spécialistes du

domaine concerné sont sollicités pour attribuer des poids aux critères, et la moyenne de leurs évaluations est ensuite adoptée comme pondération finale. Toutefois, cette méthode présente plusieurs limites, notamment une forte subjectivité, une incertitude inhérente, ainsi qu'une certaine incohérence entre les jugements exprimés [Al Fozai et Wahid, 2022].

Dans la littérature, comme le souligne Yazdi dans sa recherche [Yazdi et Zarei, 2018], certaines méthodes d'agrégation simples — telles que la moyenne pondérée fondée sur des critères tels que l'âge, l'expérience personnelle, l'ancienneté ou le niveau de formation — sont parfois utilisées pour calculer les poids des experts. Néanmoins, ces approches n'offrent pas un niveau d'objectivité suffisant, ce qui peut compromettre la qualité et la fiabilité des analyses menées.

Afin de surmonter ces limitations, plusieurs études ont proposé de recourir à la méthode hiérarchique analytique floue (FAHP), une technique issue de la prise de décision multicritère (MCDM). Cette méthode permet de convertir les jugements qualitatifs des experts en poids flous, offrant ainsi une représentation plus objective, cohérente et robuste que les pondérations obtenues par des moyens conventionnels [Al Fozai et Wahid, 2022].

Dans ce contexte, la théorie des ensembles flous a été largement mobilisée pour agréger les avis d'experts, notamment en vue de réduire les incertitudes et d'atténuer les ambiguïtés liées aux données de défaillance. Son principal avantage réside dans sa capacité à quantifier les évaluations qualitatives, limitant ainsi la subjectivité et renforçant la fiabilité des résultats obtenus.

(a) Processus Hiérarchique Analytique Flou (FAHP)

Plusieurs méthodes FAHP (Processus Hiérarchique Analytique Flou) ont été développées pour traiter les facteurs de pondération dans les problématiques de prise de décision multicritère (MCDM), en raison de l'imprécision et de l'ambiguïté inhérentes au processus décisionnel humain [Van Laarhoven et Pedrycz, 1983, Buckley, 1985, Chang, 1996].

Parmi les méthodes FAHP présentes dans la littérature, la méthode d'analyse d'étendue de Chang-EAM [Chang, 1996] demeure la technique la plus populaire et couramment appliquée pour obtenir des poids nets. En conséquence, l'FAHP-EAM a été utilisée dans cette étude afin d'estimer les valeurs de comparaison par paires, tant des critères décisionnels que des alternatives. [Kubler et al., 2016]. La principale raison de l'utilisation de cette approche réside dans sa supériorité par rapport aux autres approches FAHP en termes de gestion de la complexité temporelle, ainsi que dans la simplicité de ses étapes de résolution du problème [Chang, 1996, Banerjee et al., 2021].

Dans la méthode FAHP-EAM, l'étape la plus importante consiste à établir des matrices de comparaison par paires floues afin d'évaluer les critères et les alternatives. Ces matrices sont construites à l'aide de l'échelle d'importance relative, représentée par des nombres flous triangulaires (TFNs) selon la méthode d'analyse d'extension de Chang (EAM) [Chang, 1996], et en s'appuyant sur les évaluations linguistiques des jugements des décideurs. Le tableau 4.7 présente les variables linguistiques utilisées pour les comparaisons par paires de chaque critère.

La procédure EAM de Chang est résumée comme suit [Chang, 1996]:

Tableau 4.7 | Variables linguistiques pour la comparaison par paires [Saaty, 1980]

Variable linguistique	Échelle floue triangulaire	Échelle réciproque floue triangulaire
Également fort	(1,1,1)	(1,1,1)
Modérément fort	(2,3,4)	$(\frac{1}{4}, \frac{1}{3}, \frac{1}{2})$
Fort	(4,5,6)	$(\frac{1}{6}, \frac{1}{5}, \frac{1}{4})$
Très fort	(6,7,8)	$(\frac{1}{8}, \frac{1}{7}, \frac{1}{6})$
Extrêmement fort	(9,9,9)	$(\frac{1}{9}, \frac{1}{9}, \frac{1}{9})$
Valeurs intermédiaires	(1,2,3)	$(\frac{1}{3}, \frac{1}{2}, 1)$
	(3,4,5)	$(\frac{1}{5}, \frac{1}{4}, \frac{1}{3})$
	(5,6,7)	$(\frac{1}{7}, \frac{1}{6}, \frac{1}{5})$
	(7,8,9)	$(\frac{1}{9}, \frac{1}{8}, \frac{1}{7})$

Étape 1 : Calcul de la matrice de comparaison par paires floue $\tilde{D} = [\tilde{a}_{ij}]$

$$\tilde{D} = \begin{bmatrix} (1,1,1) & \tilde{a}_{12} & \cdots & \tilde{a}_{1n} \\ \tilde{a}_{21} & (1,1,1) & \cdots & \tilde{a}_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{a}_{n1} & \tilde{a}_{n2} & \cdots & (1,1,1) \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

où $\tilde{a}_{ij} \times \tilde{a}_{ji} \approx 1$ et $\tilde{a}_{ij} \cong \frac{\omega_i}{\omega_j}, i, j = 1, \dots, n$. Tous les $\tilde{a}_{ij} = (l_{ij}, m_{ij}, u_{ij}), i, j = 1, \dots, n$ sont des nombres flous triangulaires.

Étape 2 : Calcul de la valeur de l'extension synthétique floue par rapport au critère i

$$S_i = \sum_{j=1}^n \tilde{a}_{ij} \left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \tilde{a}_{ij} \right]^{-1} \quad (4.3)$$

Les termes $\sum_{j=1}^n \tilde{a}_{ij}$ et $\left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \tilde{a}_{ij} \right]^{-1}$ sont définis comme suit :

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^n \tilde{a}_{ij} &= \left(\sum_{j=1}^n l_j, \sum_{j=1}^n m_j, \sum_{j=1}^n u_j \right) \\ \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \tilde{a}_{ij} &= \left(\sum_{i=1}^n l_i, \sum_{i=1}^n m_i, \sum_{i=1}^n u_i \right) \\ \left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \tilde{a}_{ij} \right]^{-1} &= \left(\frac{1}{\sum_{i=1}^n u_i}, \frac{1}{\sum_{i=1}^n m_i}, \frac{1}{\sum_{i=1}^n l_i} \right) \end{aligned}$$

Étape 3 : Calcul du degré de possibilité

Pour comparer deux nombres flous M_1 et M_2 , on définit :

$$\begin{aligned} V(M_2 \geq M_1)_{y \geq x} &= \sup_{x \geq y} [\min(\mu_{M_1}(x), \mu_{M_2}(y))] \\ &= hgt(M_1 \cap M_2) = \mu_{M_2}(d) \\ &= \begin{cases} 1, & \text{si } m_2 \geq m_1 \\ 0, & \text{si } l_2 \geq u_2 \\ \frac{(l_1 - u_2)}{(m_2 - u_2) - (m_1 - l_1)}, & \text{sinon} \end{cases} \end{aligned} \quad (4.4)$$

où $M_1 = (l_1, m_1, u_1)$ et $M_2 = (l_2, m_2, u_2)$, et d est l'ordonnée du point d'intersection le plus élevé D entre μ_{M_1} et μ_{M_2} .

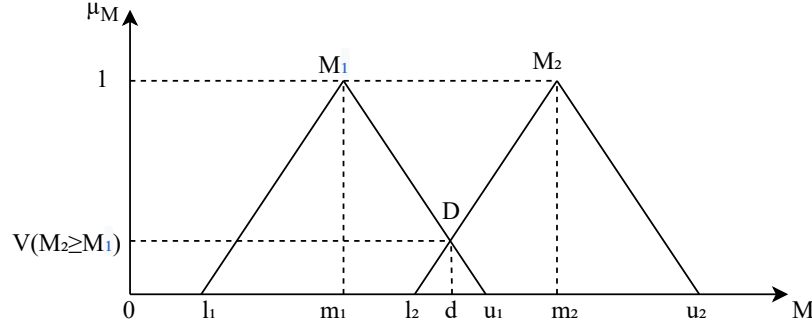


Figure 4.7 | Intersection entre deux nombres flous M_1 et M_2 [Chang, 1996]

Ainsi, le degré de possibilité qu'un nombre flou soit supérieur à k nombres flous S_i ($i = 1, 2, \dots, k$) est défini par :

$$V(S \geq S_1, S_2, \dots, S_k) = \min V(S \geq S_i), \quad i = 1, 2, \dots, k \quad (4.5)$$

Étape 4 : Calcul du vecteur de poids et normalisation du vecteur de poids non flou
On définit :

$$d'(A_i) = \min V(S_i \geq S_k), \quad i, k = 1, 2, \dots, n; \quad k \neq i \quad (4.6)$$

Le vecteur de poids est alors donné par :

$$W' = (d'(A_1), d'(A_2), \dots, d'(A_n))^T$$

Le vecteur de poids non flou normalisé est :

$$W = (d(A_1), d(A_2), \dots, d(A_n))^T$$

(b) Processus Hiérarchique Analytique Flou Modifié (M-FAHP)

Cependant, cette approche initiale décrite ci-après peut attribuer un poids nul à un critère ou à une alternative, du fait de l'utilisation de l'opérateur min pour estimer le degré de possibilité, lequel peut alors prendre la valeur zéro. Afin de déterminer la méthode FAHP la mieux adaptée pour résoudre ce problème sans compromettre la cohérence des résultats, plusieurs variantes fondées sur la méthode d'analyse d'ampleur (Extent Analysis Method) ont été comparées. Les résultats montrent que la technique FAHP-EAM Modifiée de Chang, telle que proposée par Ahmed et Kilic, constitue l'approche la plus appropriée pour remédier à l'attribution de poids nuls [Lima-Junior and Carpinetti, 2020, Ahmed and Kilic, 2015].

Le modèle proposé par Chang (FAHP-EAM) est souvent à tort classé comme la méthode d'Analyse de l'Extension Floue, qui ne constitue en réalité que la première partie de ce modèle. L'autre partie concerne la défuzzification et/ou le classement des poids, réalisé selon le principe de comparaison des nombres flous en fonction de leur degré de possibilité.

L'examen de la littérature existante montre qu'il n'existe pas de méthode généralement acceptée pour classer les nombres flous [Zhü, 2014]. De nombreux articles traitent de ce sujet [Nejad and Mashinchi, 2011, Sam'an et al., 2021, Ezzati et al., 2012, Abbasi and Abbasi, 2007].

Dans l'étude de [Ahmed and Kilic, 2015], une version modifiée de la méthode FAHP est proposée. Contrairement à la méthode traditionnelle qui utilise le degré de possibilité, cette approche adopte la défuzzification par centroïde, initialement proposée par Ross [Ross, 2005]. La première étape consiste à calculer l'extension synthétique floue conformément au modèle EAM de Chang. Ensuite, pour établir le classement des poids, le degré de possibilité est remplacé, dans la seconde partie de la procédure, par la méthode de défuzzification par centroïde, qui est l'une des approches de défuzzification les plus couramment utilisées [Wang, 2009].

6.2.3 Estimation des probabilités de défaillance incertaines

(a) Agrégation des avis d'experts

L'opinion de chaque expert concernant un seul événement de base peut varier en fonction de son expérience et de ses connaissances. Il est donc essentiel d'agréger ces opinions afin d'obtenir un consensus pour chaque événement de base. Plusieurs méthodes d'agrégation basées sur la théorie des ensembles flous sont disponibles pour combiner les avis d'experts dans un processus de prise de décision collective, notamment la méthode max-min Delphi, max product, linear opinion pool, sum-production, and similarity aggregation method (SAM) [Yazdi and Zarei, 2018]. Dans cette étude, la méthode d'agrégation par similarité (SAM) a été utilisée, car elle est reconnue comme une technique simple et directe [Ramzali et al., 2015].

Les étapes suivantes illustrent le processus de la méthode d'agrégation par similarité appliqué dans cette étude [Hsu and Chen, 1996]:

Étape 1 : Calcul du degré de similarité, également appelé degré d'accord.

Le degré d'accord entre chaque paire d'experts E_u et E_v , noté $S_{uv}(\tilde{R}_u, \tilde{R}_v)$, est obtenu comme suit :

$$S(\tilde{A}, \tilde{B}) = 1 - \frac{1}{J} \sum_{i=1}^J |a_i - b_i| \quad (4.7)$$

$\tilde{A} = (a_1, a_2, a_3)$ et $\tilde{B} = (b_1, b_2, b_3)$ sont deux nombres flous triangulaires standard.

De plus, $S(\tilde{A}, \tilde{B}) \in [0, 1]$, et une valeur élevée de $S(\tilde{A}, \tilde{B})$ indique une meilleure similarité entre les deux nombres flous $\tilde{A}$ et $\tilde{B}$.

En outre, la valeur de J est égale à 3 pour les nombres flous triangulaires et à 4 pour les nombres flous trapézoïdaux.

Étape 2 : Construction de la matrice d'accord (AM).

$$AM = \begin{bmatrix} 1 & S_{12} & \cdots & S_{1v} & \cdots & S_{1n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ S_{u1} & S_{u2} & \cdots & S_{uv} & \cdots & S_{un} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ S_{n1} & S_{n2} & \cdots & S_{nv} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

où $S_{uv} = S(\tilde{R}_u, \tilde{R}_v)$ si $u \neq v$, et $S_{uv} = 1$ si $u = v$, les éléments diagonaux de la matrice AM étant tous égaux à 1.

Étape 3 : Calcul du degré moyen d'accord (AA) des opinions des experts, à l'aide de l'équation suivante :

$$AA(E_u) = \frac{1}{J-1} \sum_{u \neq v, v=1}^J S(\tilde{R}_u, \tilde{R}_v) \quad (4.9)$$

Étape 4 : Calcul du degré d'accord relatif (RA) pour chaque expert $E_u (u = 1, 2, \dots, J)$, selon la formule suivante :

$$RA(E_u) = \frac{AA(E_u)}{\sum_{u=1}^J AA(E_u)} \quad (4.10)$$

Étape 5 : Estimation du degré du coefficient de consensus $CCD(E_u)$ des opinions des experts $E_u (u = 1, 2, \dots, J)$, selon l'expression suivante :

$$CCD(E_u) = \beta \cdot W(E_u) + (1 - \beta) \cdot RA(E_u) \quad (4.11)$$

où :

- $W(E_u)$ représente le poids de chaque expert, et
- β est le facteur de relaxation de la procédure proposée, avec $\beta (0 \leq \beta \leq 1)$.

Le paramètre β illustre l'importance de $W(E_u)$ par rapport à $RA(E_u)$. Des études antérieures ont suggéré que le coefficient de consensus de chaque expert peut être mieux appréhendé en tenant compte de la valeur relative de son jugement. Par conséquent, il est essentiel pour le décideur d'attribuer une valeur appropriée à β , la valeur optimale étant de 0,5 afin de couvrir l'ensemble des aspects [Hsu and Chen, 1996, Yazdi et al., 2017].

Étape 6 : Enfin, le résultat agrégé du jugement des experts, noté $\tilde{R}_{AG}$, est déterminé comme suit :

$$\begin{aligned} Z_i &= \tilde{R}_{AG} \\ &= CCD(E_1) \otimes \tilde{R}_1 \oplus CCD(E_2) \otimes \tilde{R}_2 \oplus \dots \\ &\dots \oplus CCD(E_m) \otimes \tilde{R}_m \\ i &= 1, 2, \dots, m \end{aligned} \quad (4.12)$$

où $\oplus$ est un opérateur d'addition floue et $\otimes$ un opérateur de multiplication scalaire floue.

(b) Défuzzification du jugement agrégé des experts (Possibilité floue)

L'objectif de cette étape est de convertir les nombres flous triangulaires ou trapézoïdaux en nombres précis, appelés possibilités floues, adaptés à l'analyse et à la prise

de décision. La défuzzification peut être réalisée à l'aide de plusieurs méthodes, telles que centroid method, mean-max membership, center of area, center of sums, and alpha-cut [Mohsendokht, 2017].

Parmi ces méthodes, la méthode du centre de gravité (COG), également appelée méthode du centre de surface (center of area-COA), est la plus couramment utilisée en raison de sa simplicité et de son efficacité pratique. C'est cette approche qui est adoptée dans cette étude. Développée en 1985 par Sugeno [Prasad and Sugeno, 1998], elle est formulée comme suit [Ramzali et al., 2015]:

$$X^* = \frac{\int u_i(x)xdx}{\int u_i(x)dx} \quad (4.13)$$

où :

- X^* = sortie défuzzifiée,
- $u_i(x)$ = fonction d'appartenance agrégée, et
- x = variable de sortie.

Comme illustré ci-dessous, la formule peut être utilisée pour défuzzifier les nombres flous trapézoïdaux et triangulaires :

a) Nombre triangulaire $A = (a_1, a_2, a_3)$

$$U_A(x) = \begin{cases} 0 & x < a_1 \\ \frac{x-a_1}{a_2-a_1} & a_1 \leq x \leq a_2 \\ \frac{a_3-x}{a_3-a_2} & a_2 \leq x \leq a_3 \\ 0 & x > a_3 \end{cases} \quad (4.14)$$

$$\begin{aligned} X^* &= \frac{\int_{a_1}^{a_2} \frac{x-a_1}{a_2-a_1} x dx + \int_{a_2}^{a_3} \frac{a_3-x}{a_3-a_2} x dx}{\int_{a_1}^{a_2} \frac{x-a_1}{a_2-a_1} dx + \int_{a_2}^{a_3} \frac{a_3-x}{a_3-a_2} dx} \\ &= \frac{1}{3}(a_1 + a_2 + a_3) \end{aligned} \quad (4.15)$$

b) Nombre trapézoïdal $A = (a_1, a_2, a_3, a_4)$

$$U_A(x) = \begin{cases} 0 & x < a_1 \\ \frac{x-a_1}{a_2-a_1} & a_1 \leq x \leq a_2 \\ \frac{a_4-x}{a_4-a_3} & a_3 \leq x \leq a_4 \\ 0 & x > a_4 \end{cases} \quad (4.16)$$

$$\begin{aligned} X^* &= \frac{\int_{a_1}^{a_2} \frac{x-a_1}{a_2-a_1} x dx + \int_{a_2}^{a_3} x dx + \int_{a_3}^{a_4} \frac{a_4-x}{a_4-a_3} x dx}{\int_{a_1}^{a_2} \frac{x-a_1}{a_2-a_1} dx + \int_{a_2}^{a_3} dx + \int_{a_3}^{a_4} \frac{a_4-x}{a_4-a_3} dx} \\ &= \frac{1}{3} \frac{(a_4 + a_3)^2 - a_4 a_3 - (a_1 + a_2)^2 + a_1 a_2}{(a_4 + a_3 - a_1 - a_2)} \end{aligned} \quad (4.17)$$

(c) Transformation des possibilités floues en probabilités de défaillance

La dernière étape du processus de défuzzification consiste à convertir une possibilité de défaillance floue en une probabilité de défaillance. Cette transformation est

réalisée à l'aide de la fonction ci-dessous, proposée par Onisawa [Onisawa, 1988]. La proportionnalité entre la valeur logarithmique d'une quantité physique et la perception humaine est l'une des caractéristiques prises en compte par cette fonction.

$$Probabilit \quad de \quad dfaillance = \begin{cases} \frac{1}{10^k} & X^* \neq 0 \\ 0 & X^* = 0 \end{cases} \quad (4.18)$$

Où,

$$k = \left(\frac{1 - X^*}{X^*} \right)^{\frac{1}{3}} \times 2.301 \quad (4.19)$$

6.2.4 Développement d'un outil d'expérimentation

Les méthodes susmentionnées, incluant les méthodes FAHP et FAHP-Modifiée pour le calcul des pondérations des experts selon l'approche EAM de Chang, la méthode SAM pour l'agrégation des jugements d'experts, ainsi que la méthode COA pour la défuzzification des jugements agrégés, fournissent des représentations sous forme de nombres flous, d'équations et de matrices. Lorsque ces calculs sont effectués manuellement, le processus devient particulièrement long. Prenons l'exemple de l'utilisation d'une matrice, dans le cas d'une comparaison par paires floue de dimension $n \gg n$ utilisée comme paramètre d'évaluation dans la méthode FAHP-EAM, le nombre d'opérations de multiplication requis est le suivant [Chang, 1996, Banerjee et al., 2021]:

$$T_n = 6n + n(n - 1) + n = n(n + 6) \quad (4.20)$$

Par ailleurs, la méthode de calcul mobilise des matrices de grande dimension contenant des nombres flous, des équations, des boucles d'itération et des données tabulaires, ce qui allonge davantage le processus de calcul manuel et limite la possibilité d'effectuer plusieurs calculs ou des analyses de sensibilité. Par conséquent, l'idée d'automatiser l'ensemble des calculs procéduraux à travers le développement d'un programme sous MATLAB s'impose progressivement. Le pseudo-code fourni ci-dessous décrit un algorithme permettant de déterminer l'ensemble des paramètres évoqués précédemment, et qui fournit en sortie les probabilités de défaillance. Ce processus repose sur une approche complète d'agrégation des jugements d'experts, traduits ensuite en probabilités de défaillance par le biais des techniques de logique floue, dans une optique d'aide à la décision.

```
Entrées : matrice de comparaison par paires des experts, matrice de comparaison par paires des
↪ critères, avis des experts, événements de base

Calculer les pondérations des critères à partir de la matrice de comparaison par paires des
↪ critères :
    Calculer l'étendue synthétique floue
    Calculer le degré de possibilité
    Calculer le degré de possibilité qu'un nombre flou soit supérieur à k nombres flous
    Calculer le vecteur des pondérations et normaliser le vecteur non flou

Calculer les pondérations des experts pour chaque critère à partir de la matrice de
↪ comparaison par paires des experts :
Pour chaque (matrice de comparaison par paires d'un expert)
    Calculer l'étendue synthétique floue
    Calculer le degré de possibilité
```

```

    Calculer le degré de possibilité qu'un nombre flou soit supérieur à k nombres flous
    Calculer le vecteur des pondérations et normaliser le vecteur non flou
Fin pour chaque

Pour chaque (pondération des experts pour chaque critère)
    pondération de l'expert = pondération sous chaque critère * pondération du critère
Fin pour chaque

Pour chaque (événement de base)
    Convertir les termes linguistiques en TFN
    Agréger les avis des experts :
        Calculer S(Eu,Ev)
        Construire la matrice d'agrégation (AM) en calculant le degré de similarité
        Calculer AA(Eu)
        Calculer RA(Eu)
        Calculer CCD(Eu)
        Calculer R(Eu)
    Déflouter les avis agrégés des experts (possibilité floue)
    Convertir la possibilité floue en probabilité de défaillance
Fin pour chaque

Sorties : probabilités de défaillance

```

6.3 Collecte des données sur les probabilités d'ignition

Une fois les données relatives aux événements de base estimées, les phénomènes dangereux résultant de la survenue de l'événement critique seront évalués.

Sur la base de cinq types d'effets — rayonnement thermique, surpression, projection de missiles, effets des gaz toxiques et dommages environnementaux — les phénomènes dangereux sont identifiés en fonction de l'événement critique retenu ainsi que des caractéristiques techniques du système étudié [Delvosalle et al., 2004a]. Parmi les scénarios envisagés, on peut citer : l'explosion de nuage de vapeur (VCE), le feu de nappe (pool fire), l'incendie de réservoir (tank fire), la torchère (jet fire), le retour de flamme (flash fire), le nuage toxique, l'incendie, la projection de missiles, la génération de surpression, la boule de feu (fireball), les dommages environnementaux, l'explosion de poussières, le boilover et le feu de nappe résultant.

Pour estimer les probabilités de survenance des phénomènes dangereux identifiés, il est nécessaire d'évaluer les niveaux de probabilité d'ignition associés à chaque branche de l'arbre d'événements. Ainsi, une analyse approfondie des probabilités de transmission, notamment celles liées à l'inflammation entre l'événement critique et chaque phénomène dangereux, doit être menée.

Selon notre étude de cas, les probabilités d'ignition requises pour le calcul des fréquences de chaque phénomène dangereux sont présentés dans le tableau 4.8:

En ce qui concerne les dommages environnementaux associés au modèle, la contamination du sol dépend principalement de la quantité de produit déversé, du type de sol et des conditions climatiques. Dans la zone étudiée, caractérisée par des températures élevées, le sol est majoritairement sableux et présente des affleurements rocheux.

Une revue approfondie des méthodes d'évaluation de la contamination des sols par les hydrocarbures a été réalisée par Rajabi et Sharifi [Rajabi and Sharifipour, 2019]. Par ailleurs, l'étude de Ciriello [Ciriello et al., 2017] propose un modèle mathématique dédié à la contamination des

Tableau 4.8 | Probabilités d'inflammation [Delvosalle et al., 2004a]

Événement intermédiaire	Probabilité
Fréquence de l'événement critique	Obtenue à partir de l'ADD
Probabilité d'inflammation immédiate (unité de stockage)	0.7
Probabilité d'inflammation différée due à la dispersion du gaz	0.5
Probabilité d'explosion de nuage de vapeur (VCE) en fonction de la probabilité de flashfire	0.67
Probabilités des événements restants	1

sols sableux par des hydrocarbures aliphatiques. Deux scénarios y sont présentés : l'un avec une nappe phréatique profonde, l'autre avec une nappe phréatique à écoulement lent. Dans notre cas, le premier scénario est retenu, compte tenu de la profondeur de la nappe phréatique dans les régions sahariennes.

L'étude initiale évaluait la probabilité de contamination à un horizon temporel de 180 jours. Toutefois, dans le cadre du suivi régulier du site industriel, une évaluation à fréquence trimestrielle est privilégiée et les probabilités suivantes sont retenus:

- Probabilité de dispersion toxique d'une nappe: 1,158E-3 ;
- Probabilité de contamination des eaux souterraines est presque nulle.

7 Évaluation de l'impact environnemental dans le cadre de l'analyse dynamique des risque

Dans cette recherche, une analyse dynamique des risques est réalisée, mettant particulièrement en évidence son intégration avec l'évaluation de l'impact environnemental. Dans cette section, le réseau bayésien est introduit ; il est utilisé pour faciliter la modélisation des scénarios évolutifs du modèle Bow-Tie au fil du temps, permettant ainsi une évaluation dynamique de l'événement critique et de leurs impacts. Par la suite, une évaluation est menée sur la contribution des événements de base individuels au sein du modèle, un processus essentiel pour prioriser les efforts d'atténuation en vue d'améliorer la performance et la sécurité du système. Enfin, une simulation est présentée afin de fournir des informations précieuses sur l'application pratique de l'analyse dynamique des risques, en particulier dans le cadre de l'évaluation de l'impact environnemental.

7.1 Analyse dynamique des risques par le réseau bayésien

Les mécanismes de mise à jour bayésienne ont émergé comme une alternative prévalente à l'analyse des arbres de défaillance en raison de leur capacité à raisonner dans des scénarios incertains et de leur architecture flexible [Yazdi et al., 2019, Guetarni et al., 2019]. Par conséquent, l'analyse de la fiabilité et des risques a largement adopté le réseau bayésien flou (FBN), qui combine la théorie des ensembles flous avec les réseaux bayésiens (BN) afin de prendre en compte l'incertitude. Il permet de traiter des environnements complexes, des données insuffisantes et l'interdépendance des facteurs de risque, conduisant ainsi à une causalité complexe et à une incertitude accrue [Guo et al., 2021].

Dans l'analyse d'un système d'alimentation en propane, des méthodes quantitatives ont été comparées. Le réseau bayésien (BN) surpasse l'arbre de défaillance en termes de robustesse de modélisation, car il peut gérer efficacement un spectre plus large de relations, qu'elles soient directes ou indirectes, entre divers facteurs. Par ailleurs, dans l'étude de Bouchiba [Bouchiba, 2013], des algorithmes ont été développés pour la conversion des structures d'arbres de défaillance en réseaux bayésiens. Cet algorithme est étendu dans cette recherche afin de convertir un modèle Bow-tie en modèle bayésien, comme présenté dans la Figure 4.8. En effet, chaque nœud du Bow-tie correspond à un nœud dans le BN, et chaque porte logique du Bow-tie est représentée par une table de probabilités dans le BN.

Les réseaux bayésiens sont des graphes acycliques composés de nœuds et d'arcs $G = (V, E)$ où V représente l'ensemble des nœuds de G , et E l'ensemble des arcs de G . Chaque nœud conditionne celui qui lui est inférieur à l'aide des probabilités conditionnelles de Bayes comme présenté par l'équation (Eq. 4.21). C'est pour cette raison qu'il est désigné sous le nom de réseau bayésien. Un espace probabilisé est défini (Ω, Z, P) , avec Ω un ensemble fini non vide, Z un ensemble de sous-ensembles de Ω , et P une mesure de probabilité sur Z avec $P(\Omega) = 1$. Un ensemble de variables aléatoires est associé aux nœuds du graphe G et défini sur (Ω, Z, P) , de telle sorte que:

$$P(V_1, V_2, \dots, V_n) = \prod P(V_i / CV_i) \quad (4.21)$$

Où, C représente les parents (ou causes) de V_i dans le graphe G [Smith et al., 2017].

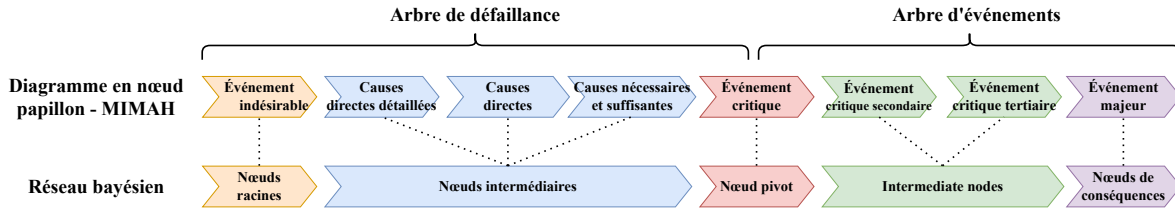


Figure 4.8 | Processus de conversion du modèle BT-MIMAH en réseau bayésien correspondant

La modélisation bayésienne du système d'étude est réalisée à l'aide du logiciel AgenaRisk. AgenaRisk constitue un outil puissant de modélisation basé sur les réseaux bayésiens, utilisé pour créer et déployer des modèles de risque complexes dans divers secteurs. Ce logiciel, développé à partir des dernières avancées en intelligence artificielle bayésienne et en raisonnement probabiliste, permet de modéliser, d'analyser et de prédire la probabilité des risques associés à des événements de base identifiés. La première version commerciale d'AgenaRisk a été lancée en 2005, ciblant initialement des secteurs à haut risque tels que la défense, les transports, les banques, les télécommunications et l'ingénierie de sécurité. Le logiciel a été particulièrement bien accueilli par les entreprises de télécommunications, en partie grâce à des modèles réutilisables et documentés qui facilitent la gestion des risques [AgenaRisk, 2025].

Un cas d'étude notable en 2008 a montré que l'utilisation d'un modèle bayésien dans AgenaRisk par une grande entreprise de télécommunications a permis des économies de 5 millions de dollars par projet en gérant efficacement les risques liés au remplacement de composants matériels sur le terrain. AgenaRisk offre une interface utilisateur intuitive qui permet aux non-spécialistes en statistiques de construire des modèles de réseaux bayésiens pour résoudre des problèmes de risque complexes. De plus, il intègre des fonctionnalités avancées telles que la

reconnaissance de modèles, l'analyse comportementale et la gestion des alertes, ce qui en fait un outil polyvalent pour la gestion des risques dans divers contextes [Fenton and Neil, 2014].

7.2 Mesures d'importance des événements de base

Afin de déterminer le degré de contribution de chaque événement de base à la survenance de l'événement critique ainsi qu'à celle des phénomènes dangereux associés, une analyse quantitative du modèle est réalisée à l'aide de la modélisation bayésienne, notamment par le calcul des mesures d'importance des composants. La mesure de Birnbaum pour des composants indépendants, introduite pour la première fois par Birnbaum en 1969, est l'une des mesures d'importance les plus couramment utilisées. Elle est déterminée en fonction de la structure de l'arbre de défaillance et de la fiabilité des composants [Birnbaum, 1968].

Le facteur d'importance marginal (MIF) parfois appelé facteur de Birnbaum pour un composant i à l'instant t dans un système S composé de n composants, est défini comme suit [Guertani et al., 2019, Guertani, 2019]:

$$I_i^B(t) = p_{(s|i)}(t) - p_{(s|\bar{i})}(t) \quad (4.22)$$

$$I_i^{CR}(t) = \frac{p_i(t)}{p_s(t)} \times I_i^B(t) \quad \text{pour } i = 1, 2, \dots, n \quad (4.23)$$

où

- $p_{(s|i)}(t)$: probabilité conditionnelle que le système soit en panne lorsque le composant i est en panne,
- $p_{(s|\bar{i})}(t)$: probabilité conditionnelle que le système soit en panne lorsque le composant i fonctionne,
- $I_i^{CR}(t)$: mesure d'importance du composant,
- $p_i(t)$ et $p_s(t)$: sont les probabilités que le composant i soit critique et qu'il soit en panne à l'instant t , lorsque le système S est assurément en panne à l'instant t .

7.3 Modélisation des effets des phénomènes dangereux

Dans cette section, les conséquences des phénomènes dangereux ont été simulées à l'aide du logiciel ALOHA. Ce dernier permet de modéliser les effets potentiels des phénomènes dangereux associés à l'événement critique du modèle, d'estimer l'étendue quantitative des zones de danger, et de proposer des mesures appropriées de maîtrise des risques.

ALOHA (Areal Locations of Hazardous Atmospheres) est un logiciel de modélisation des atmosphères dangereuses, développé conjointement par l'Office of Response and Recovery de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) et le Bureau de gestion des urgences de l'Environmental Protection Agency (EPA) [U.S. Environmental Protection Agency, 2025]. Il est conçu pour les professionnels en charge des déversements de produits chimiques, de la préparation aux situations d'urgence et des formations associées. Le logiciel permet de simuler divers scénarios, notamment la toxicité, l'inflammabilité, la diffusion thermique des gaz toxiques,

ainsi que les incendies et explosions impliquant des produits chimiques dangereux. Il évalue avec précision les effets du rayonnement thermique, de la surpression due aux explosions et détermine les zones de menace associées aux rejets de substances dangereuses. En combinaison avec MARPLOT, ALOHA permet d'émettre des avertissements sur les zones à risque et constitue un outil précieux pour l'élaboration de plans d'urgence [Yang et al., 2019].

En saisissant des données spécifiques, comme illustré à la figure 4.9, la simulation permet de modéliser et de générer des prévisions concernant les zones de menace pour divers types d'effets dangereux tels que la toxicité, l'inflammabilité, le rayonnement thermique et la surpression, en lien avec des rejets chimiques entraînant la dispersion de gaz toxiques, des incendies et/ou des explosions. En outre, les résultats peuvent être représentés graphiquement et affichés sur des cartes, ce qui facilite la visualisation des schémas de dispersion prévus des substances dangereuses dans une zone donnée, incluant les zones affectées, les niveaux de concentration et les zones d'impact potentielles.

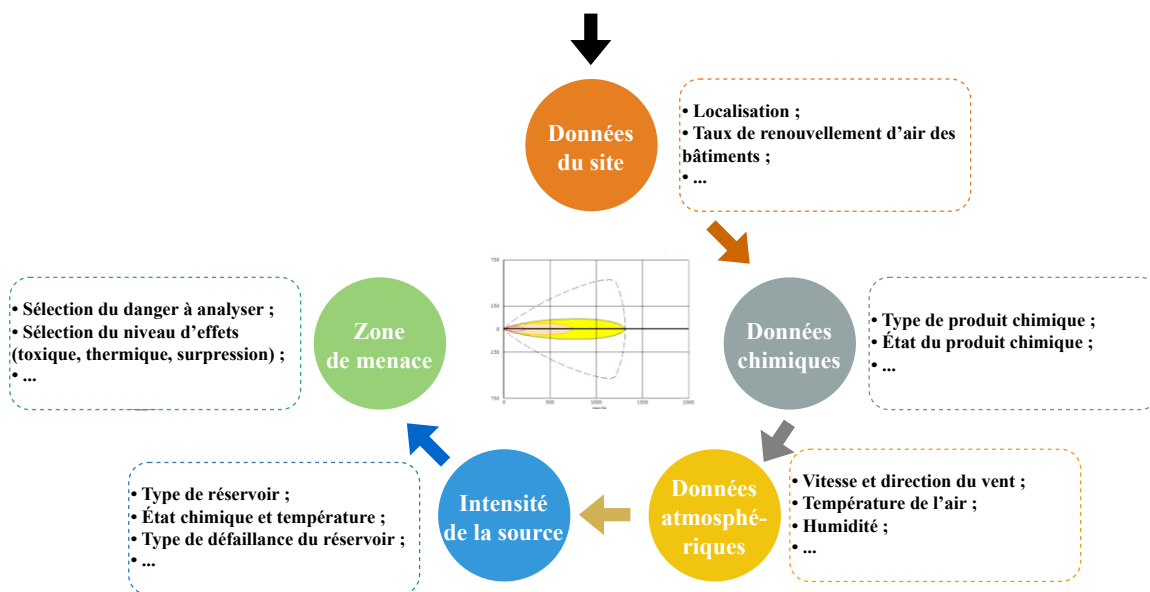


Figure 4.9 | Cadre de données de simulation sous ALOHA

Les accidents industriels impliquant des substances dangereuses peuvent engendrer divers types d'effets dommageables, affectant à la fois les structures et les individus exposés. Parmi ces effets, les impacts thermiques, les surpressions et la toxicité constituent des menaces majeures nécessitant une évaluation rigoureuse. L'identification des seuils critiques pour chacun de ces phénomènes permet de mieux comprendre leurs implications et d'adopter des mesures de prévention et de protection adaptées [MEDD-INERIS, 2004]:

- Effets thermiques:

L'évaluation des effets thermiques prend en compte à la fois les conséquences structurelles et humaines.

- (a) En ce qui concerne l'intégrité structurelle, une intensité thermique de 32 kW/m^2 entraîne des dommages aux installations protégées, tandis qu'un seuil légère-

ment inférieur de 8 kW/m² indique un risque potentiel pour les installations non protégées.

- (b) Lors de l'examen des effets sur l'être humain, différents seuils définissent des degrés de risque variés. Une exposition à une intensité thermique de 10 kW/m² pendant 20 secondes conduit à une issue fatale pour 1 % des individus non protégés. Une intensité thermique de 6,5 kW/m² indique la possibilité de conséquences graves, directes ou indirectes, pouvant se manifester immédiatement ou à long terme. De plus, à une intensité de 2,5 kW/m², l'accident représente un danger pour les individus sensibles ou inattentifs.

- Effets de surpression:

- (a) Concernant les seuils des effets dominos, une surpression de 300 mbar entraîne des dommages structurels sévères. Un seuil légèrement inférieur de 160 mbar marque le début des dommages structurels, déclenchant une réaction en chaîne d'effets dominos au sein du système.
- (b) L'impact sur les individus devient une préoccupation majeure à certains niveaux de surpression : à 50 mbar, des dommages irréversibles ou létaux sont observés, indiquant une situation hautement dangereuse. De plus, des dommages graves aux individus sont constatés dès le seuil inférieur de 25 mbar.

- Effets toxique:

Ces indicateurs guident la mise en place de mesures préventives et d'actions de protection en temps opportun.

- (a) Une exposition à 33 000 ppm selon le critère d'action protectrice PAC-2 entraîne des effets irréversibles ou d'autres atteintes graves à la santé susceptibles d'altérer des fonctions essentielles. Face à ce niveau de toxicité, des actions immédiates s'imposent afin de prévenir tout risque sanitaire potentiel.
- (b) À une concentration inférieure de 3 000 ppm PAC-1, des effets légers mais transitoires sur la santé sont attendus. Dans ces cas, une action de protection immédiate est jugée nécessaire pour atténuer les conséquences sanitaires potentielles.

8 Conclusion

Ce chapitre a présenté de manière structurée une étude de cas représentative dans le domaine de l'analyse des risques en contexte incertain. Après une présentation détaillée du système étudié, les dangers ont été identifiés et analysés à l'aide des méthodes HAZOP et MIMAH, permettant de structurer les causes et les conséquences dans un modèle Bow-tie. La quantification des risques a ensuite été approfondie par l'exploitation de données disponibles et incertaines des probabilités de défaillance à l'aide de techniques basées sur le jugement d'experts, la logique floue et la pondération et l'aggrégation via les approches FAHP-FAHP Modifié-SAM-COA respectivement.

L'intégration d'un outil d'expérimentation automatisé a permis de traiter les calculs complexes et de renforcer la fiabilité des résultats. Par ailleurs, l'évaluation de l'impact environnemental a été menée dans le cadre d'une analyse dynamique des risques via des réseaux bayésiens, fournissant une vision évolutive et systémique du modèle. La modélisation des

phénomènes dangereux et la simulation de leurs conséquences par le logiciel ALOHA ont complété l'approche, en visualisant les zones d'impact et en facilitant l'élaboration de mesures de maîtrise adaptées.

Ainsi, cette démarche offre une base solide pour la prise de décision en matière de prévention et de gestion des risques industriels, tout en intégrant les enjeux environnementaux et l'incertitude inhérente aux données

CHAPITRE 5

Expérimentation et résultats

1 Introduction

Ce chapitre est consacré à la mise en œuvre pratique de la méthodologie développée dans le chapitre précédent, à travers une série d'expérimentations appliquées au cas d'étude présenté. Après avoir défini les approches d'analyse des risques, tant qualitatives que quantitatives, nous procédons ici à leur application concrète afin de valider le cadre méthodologique adopté et d'évaluer la pertinence des méthodes mobilisés.

Dans un premier temps, les résultats issus de l'analyse HAZOP et de la matrice d'évaluation des risques sont exposés. Ensuite, la transformation du scénario critique en modèle Bow-tie selon la démarche MIMAH est détaillée, suivie de leur quantification à travers l'arbre de défaillance et l'arbre d'événements. La prise en compte des données incertaines via le jugement d'experts, la pondération, l'agrégation floue et la défuzzification est également traitée. Enfin, une analyse dynamique est réalisée à l'aide d'un réseau bayésien afin d'évaluer l'impact des causes identifiées sur les conséquences potentielles, notamment sur le plan environnemental.

Ce chapitre a ainsi pour objectif de démontrer l'efficacité et la robustesse de l'approche développée pour l'analyse des risques en contexte d'incertitude, en apportant des résultats concrets, interprétables et utiles pour la prise de décision en matière de sécurité et de prévention.

2 HAZOP/Matrice d'évaluation des risques

Une évaluation semi quantitative a été réalisée afin de prédire les dangers potentiels et leurs risques associées et les problèmes d'opérabilité pouvant conduire à des scénarios d'accidents impliquant le réservoir de stockage du condensat. Le processus a commencé par l'identification de tous les paramètres opérationnels (débit, température, pression, niveau, composition du mélange) et de leurs déviations possibles à l'aide de mots guides comme indiqué dans le tableau

4.2. Cette étape a été réalisée en se basant sur les mesures de sécurité existantes présentées dans la description du système (Section 2).

L'étude développée a permis d'identifier "28 risques", assimilés à des scénarios d'accidents. Ceux-ci ont été évalués et positionnés dans une matrice de risques en fonction de l'estimation de leur gravité et de leur probabilité d'occurrence en trois groupes : risques inacceptables (zone rouge de la matrice), risques aussi bas que raisonnablement possible (ALARP, zone jaune de la matrice) et risques acceptables (zone verte de la matrice). Conformément à la démarche MIMAH, ces scénarios ont ensuite été regroupés en six événements critiques sur la base de la similarité de leurs conséquences, comme illustré respectivement dans le tableau 5.1 et le tableau 5.2.

G	1	R7, R26	R1, R2, R3, R5		
	2	R8, R10, R13, R18, R22	R4, R12, R17, R19, R21, R23, R27, R28	R6, R9, R11, R14, R16, R15, R20, R24, R25	
	3				
	4				
		1	2	3	4
		P			

Tableau 5.1 Classement des niveaux de criticité de 28 risques identifiés par la démarche HAZOP

EC1	Inflammation et départ du feu (R24, R25)
EC2	Brèche en phase liquide (R5 R28)
EC3	Fuite sur canalisation en phase liquide (R7, R26, R8, R10 , R13, R18, R22, R1, R2, R3, R15)
EC4	Rupture catastrophique (R12, R17, R19, R21, R23, R6, R9, R11, R14, R16, R20)
EC5	Effondrement du bac (R4)
EC6	Effondrement du toit (R27)

Tableau 5.2 Structuration des risques en catégories d'événements critiques de MIMAH en fonction de leurs impact

Les résultats de cette analyse montrent, dans un premier temps, que les deux événements critiques "Rupture catastrophique" et "Fuite sur canalisation en phase liquide" sont associés à un nombre important de scénarios de risques susceptibles de les engendrer, comme illustré dans le tableau 5.2.

Cependant, le tableau 5.1 et la figure 5.2 et mettent en évidence qu'un nombre significatif de scénarios d'accidents conduisant à l'événement critique "Rupture catastrophique" présentent simultanément :

- une probabilité élevée, évaluée à “3 – Probable” : correspondant à des événements déjà survenus et susceptibles de se reproduire au cours de la vie de l’installation, avec une fréquence estimée entre 10^{-2} et 10^{-1} par an ;
- une gravité notée “2”, traduisant des conséquences telles que des blessures significatives, une pollution interne maîtrisée, des dommages matériels mineurs ou un arrêt temporaire de la production.

En outre, ces scénarios de risques se situent dans la zone ALARP la plus critique de la matrice de risques. Par conséquent, l’événement “Rupture catastrophique” a été retenu comme événement critique principal du système, en vue d’un développement plus approfondi dans l’étape suivante de l’analyse.

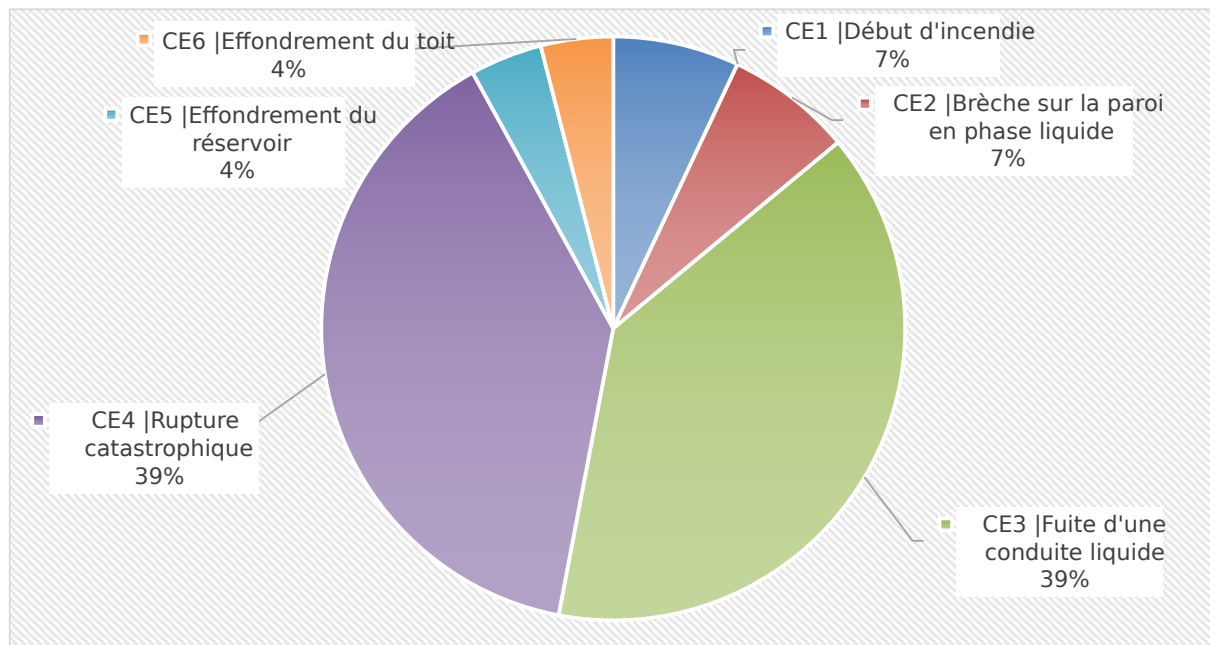


Figure 5.1 Classement des scénarios d’accidents des résultats de HAZOP selon les événements critiques de la méthodologie MIMAH

3 Méthode Bow-tie basée sur MIMAH

3.1 Développement de l’arbre de défaillance (ADD)

À la suite de l’identification de l’événement critique “Rupture catastrophique”, son arbre de défaillance a été élaboré conformément à la méthodologie décrite dans le chapitre précédent (Section 5.1). Ce développement a été réalisé à l’aide du logiciel *Arbre Analyste* [Arbre Analyste, 2024], un outil spécialisé dans la modélisation des arbres de défaillance. Ce dernier a permis de structurer rigoureusement les causes identifiées à différents niveaux, en s’appuyant sur une logique combinatoire (portes AND/OR) conforme à la démarche MIMAH, tout en intégrant les spécificités du système analysé issues de l’étude HAZOP.

L’arbre générique proposé dans le guide MIMAH [Debray et al., 2004] a servi de point de départ pour structurer la partie gauche du modèle Bow-tie. Ce modèle été adapté au cas étudié

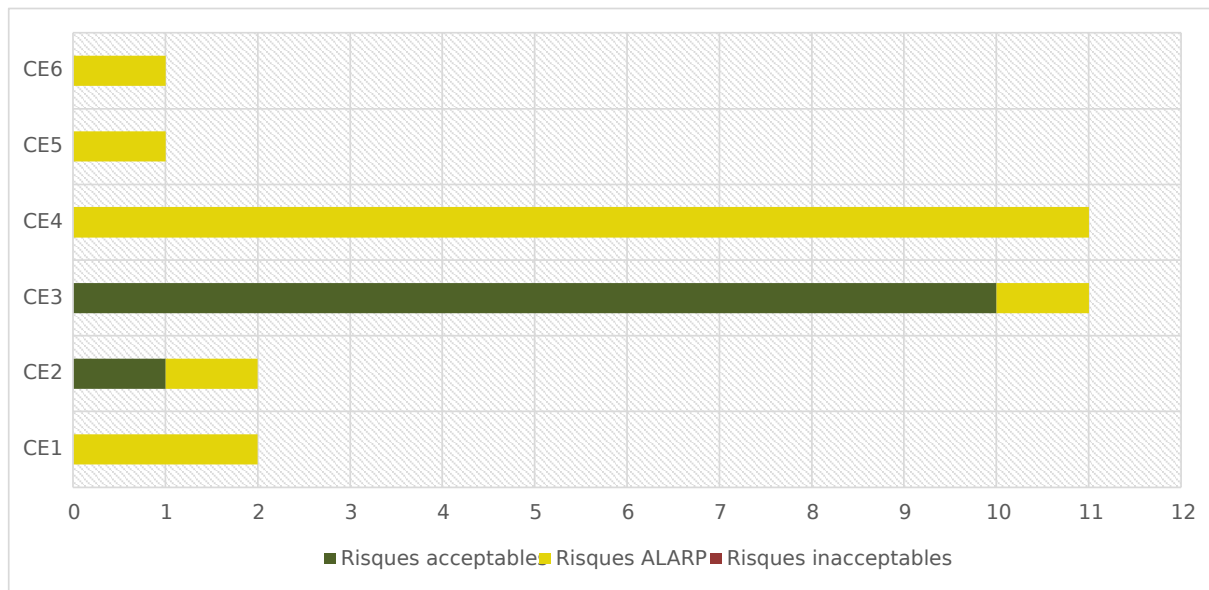


Figure 5.2 | Classification des événements critiques du réservoir

par l'intégration des causes spécifiques identifiées lors de l'analyse HAZOP. Cette adaptation a permis de produire un arbre de défaillance représentatif des conditions réelles de fonctionnement du système, intégrant l'ensemble des causes pouvant raisonnablement conduire à la rupture catastrophique. Le résultat final de cette étape est présenté dans la figure 5.3.

L'événement principal, ou événement sommet, est la "rupture catastrophique". L'arbre se décompose en plusieurs branches principales, chacune représentant une cause intermédiaire ou un mécanisme de défaillance pouvant conduire à cet événement critique.

L'arbre repose sur deux types de portes logiques :

- **OR (OU)** : l'événement se produit dès lors qu'au moins une des causes associées survient ;
- **AND (ET)** : l'événement ne se manifeste que si toutes les causes associées se produisent simultanément.

Les événements intermédiaires majeurs, tels que "réservoir rempli au-delà du niveau normal", "combustion interne et explosion", "surpression causée par la pompe" ou encore "obstruction soudaine", sont reliés par des portes OR ou AND, selon la logique fonctionnelle du système.

Les événements de base, situés à la base de l'arbre, constituent les causes premières. Ils incluent notamment :

- des défaillances techniques (défaillance de vanne, pompe bloquée, défaillance interne de pompe, défaillance de l'indicateur de niveau, coupure d'électricité, corrosion, erreur de fabrication) ;
- des erreurs humaines (erreur de manipulation, installation incorrecte de la pompe, maintenance défectueuse) ;

- des facteurs environnementaux ou externes (impact de projectile, risque sismique sous-estimé, échauffement externe) ;
- des insuffisances organisationnelles (absence ou défaut de maintenance, utilisation de matériaux inadaptés).

L'arbre met en évidence que la rupture catastrophique peut résulter soit de la combinaison simultanée, soit de la survenue isolée de plusieurs événements de base. Ces derniers sont reliés aux événements intermédiaires par des portes logiques, illustrant les différentes chaînes causales possibles menant à la défaillance.

Cet arbre de défaillance développé en se basant sur la méthodologie MIMAH fournit une représentation structurée et exhaustive des causes potentielles d'une rupture catastrophique. Il intègre des événements techniques, humains et organisationnels, en s'appuyant sur une logique combinatoire claire fondée sur l'utilisation des portes AND et OR.

3.2 Développement de l'arbre des événements (ADE)

L'arbre des événements de l'événement critique a été élaboré en s'appuyant sur la méthode MIMAH, qui repose sur la construction d'arbres génériques d'événements pour modéliser les scénarios d'accident majeurs dans les installations industrielles afin d'aboutir aux phénomènes dangereux possibles. Cette approche méthodologique nous a permis de structurer de manière systématique l'ensemble des évolutions possibles faisant suite à l'occurrence de la rupture catastrophique du réservoir de stockage du condensat.

La mise en œuvre de cet arbre des événements a été réalisée manuellement, en identifiant et en hiérarchisant les différentes branches correspondant aux issues possibles de la rupture, telles que la formation d'un nuage toxique, l'incendie de nappe, la formation et l'inflammation d'un aérosol, la dispersion de substances toxiques dans l'environnement, ou encore la génération de surpression et l'éjection de missiles. Chaque branche de l'arbre représente ainsi une séquence d'événements consécutifs, intégrant à la fois les phénomènes physiques (boule de feu, explosion, contamination des eaux souterraines, nuage toxique, etc.) et les barrières de sécurité susceptibles d'intervenir (non-inflammation, confinement, etc.).

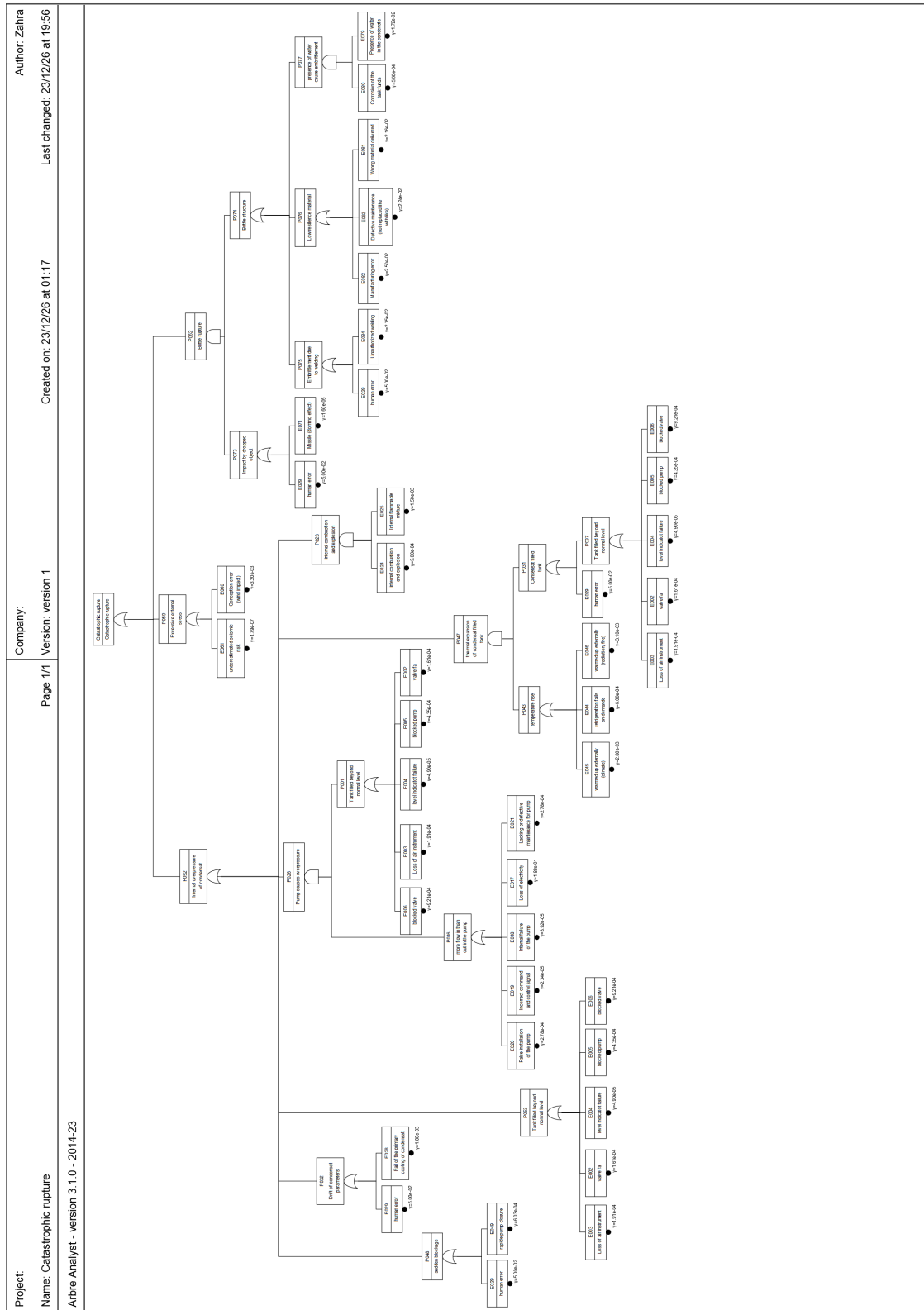
3.3 Développement du modèle noué de papillon (Bow-Tie)

La figure 5.4 illustre le réseau bayésien correspondant, développé pour l'analyse de la défaillance catastrophique du bac de stockage de condensat et ces éventuelles phénomènes dangereux résultant. Ce modèle a été élaboré à l'aide du logiciel *AgenaRisk* [AgenaRisk, 2025], reconnu pour ses performances en modélisation probabiliste et en analyse des risques. Il intègre les deux arbres développés précédemment : l'ADD est présenté dans la partie inférieure du réseau et l'ADE est illustré dans sa partie supérieure.

Le réseau bayésien développé s'inspire de la logique de l'arbre de défaillance classique, tout en l'enrichissant par l'intégration de probabilités conditionnelles associées à chaque événement de base. Chaque nœud du réseau représente un événement ou une condition (par exemple : "rupture catastrophique", "surpression interne", "contrainte externe excessive", etc.), et les arcs reliant ces nœuds traduisent les dépendances causales entre les différents événements.

Chaque événement est modélisé selon deux états possibles : *True* (vrai) ou *False* (faux), avec des probabilités associées à chacun de ces états (ces valeurs seront discutées dans la section suivante). Cette représentation probabiliste permet d'estimer la vraisemblance de survenue de l'événement principal, à savoir la "rupture catastrophique", en fonction des probabilités d'occurrence des événements de base et intermédiaires.

L'utilisation d'un tel réseau offre une flexibilité considérable dans l'analyse, en permettant l'actualisation dynamique des probabilités à mesure que de nouvelles informations deviennent disponibles. Il s'agit là d'un avantage majeur par rapport aux approches purement déterministes, notamment dans les contextes caractérisés par des données incomplètes, incertaines ou évolutives.



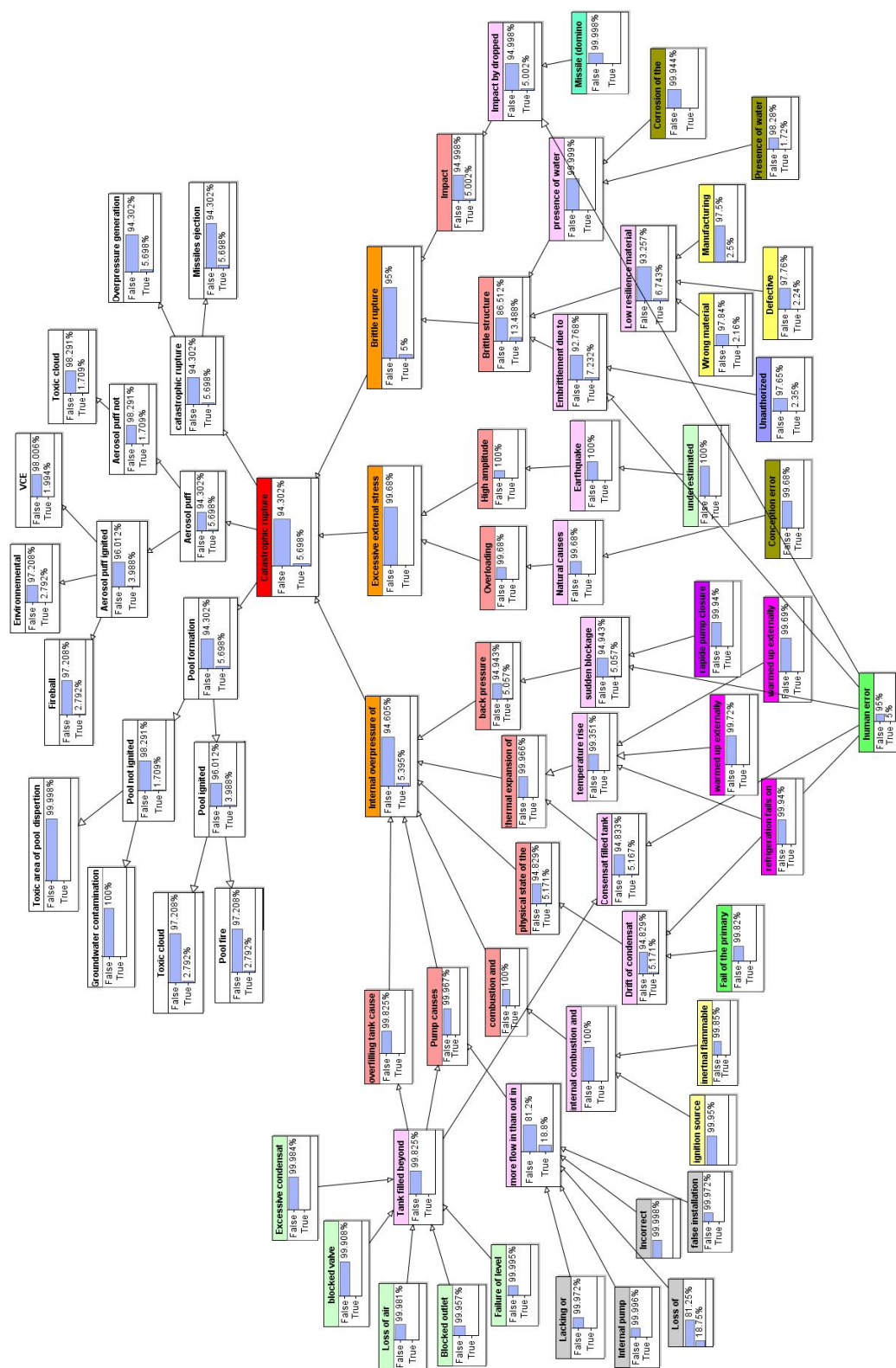


Figure 5.4 Réseau bayésien pour l'accident majeur "Rupture catastrophique" du réservoir de stockage de condensat

4 Quantification du Bow-tie

4.1 Quantification de l'ADD

Pour obtenir la probabilité de défaillance de l'événement critique, la probabilité de tous les événements de base (BEs) est nécessaire.

Le tableau 5.3 présente la liste des événements de base (EB) de l'arbre de défaillance relatif à la rupture catastrophique, en associant à chacun d'eux une probabilité de défaillance exprimée en défaillances par 10^6 heures, lorsqu'elle est disponible.

Les événements de base (EB1 à EB27) sont catégorisés en deux classes selon la disponibilité des données :

- **Événements avec probabilité de défaillance disponible** : Les événements de base pour lesquels une probabilité numérique a pu être attribuée (à savoir **EB1** à **EB10**, **EB13**, **EB14**, **EB18**, **EB20**, **EB25** et **EB27**) s'appuient sur des données quantitatives vérifiables, issues de bases de données de fiabilité reconnues. Leurs taux de défaillance ont ainsi pu être déterminé de manière rigoureuse. Les probabilités associées ont été déterminées à l'aide des équations 4.1 du chapitre 4 et comme discuter dans les équations du 2.25 au 2.28 du chapitre 2, après collecte des taux de défaillance auprès de sources spécialisées telles que *OREDA*, *NPRD*, ou encore le *CCPS*.
- **Événements sans probabilité de défaillance** : Pour certains événements de base, aucun paramètre de fiabilité ni taux de défaillance n'a pu être identifié dans la littérature scientifique ou les bases de données spécialisées. C'est notamment le cas des événements marqués par la mention "Jugement d'experts basé sur les approches floues" (à savoir **EB11**, **EB12**, **EB15**, **EB16**, **EB17**, **EB19** ainsi que **EB21** à **EB24**) et **EB26**. Cette absence de données empiriques justifie le recours à une évaluation de l'incertitude.

Tableau 5.3 Significations des événements de base dans l'arbre de défaillance de la rupture catastrophique et leurs probabilités de défaillance

Événement de base	Signification	Disponibilité des données de défaillance (Par 10 ⁶ heures)	Probabilité
EB1	Stockage excessif de condensat dû à la défaillance de la vanne	Disponible	1,6092E-04
EB2	Perte d'air instrumenté	Disponible	1,9064E-04
EB3	Vanne interne bloquée entraînant un remplissage excessif	Disponible	9,2059E-04
EB4	Pompe de sortie bloquée entraînant un remplissage excessif	Disponible	4,3465E-04
EB5	Défaillance des indicateurs de niveau	Disponible	4,9006E-05
EB6	Maintenance insuffisante ou défectueuse de la pompe	Disponible	2,7756E-04
EB7	Perte d'électricité	Disponible	1,8750E-01
EB8	Défaillance interne de la pompe	Disponible	3,9205E-05
EB9	Signal de commande et de contrôle incorrect	Disponible	2,3397E-05
EB10	Mauvaise installation de la pompe	Disponible	2,7756E-04
EB11	Source d'inflammation interne	Non disponible	Jugement d'experts basé sur l'approche floue
EB12	Mélange inflammable interne	Non disponible	Jugement d'experts basé sur l'approche floue
EB13	Défaillance du refroidissement primaire du condensat	Disponible	1,8031E-03
EB14	Erreur humaine (échec de la procédure de remplissage du réservoir / oubli de matériel après intervention / mauvaise procédure de soudage / intervention malveillante)	Disponible	5,00E-02
EB15	Échec du système de réfrigération à la demande	Non disponible	Jugement d'experts basé sur l'approche floue
EB16	Réchauffement externe (climat)	Non disponible	Jugement d'experts basé sur l'approche floue
EB17	Réchauffement externe (rayonnement thermique à proximité, incendie...)	Non disponible	Jugement d'experts basé sur l'approche floue
EB18	Fermeture rapide de la pompe	Disponible	6,0276E-04
EB19	Erreur de conception ou d'installation (vitesse du vent > 120 km/h)	Non disponible	Jugement d'experts basé sur l'approche floue
EB20	Risque sismique sous-estimé	Disponible	0,179E-06
EB21	Soudage non autorisé	Non disponible	Jugement d'experts basé sur l'approche floue
EB22	Matériau incorrect livré (pièce de rechange)	Non disponible	Jugement d'experts basé sur l'approche floue
EB23	Maintenance défectueuse (non remplacement à l'identique)	Non disponible	Jugement d'experts basé sur l'approche floue
EB24	Erreur de fabrication	Non disponible	Jugement d'experts basé sur l'approche floue
EB25	Corrosion des fonds du réservoir	Disponible	0,56E-03
EB26	Présence d'eau et de produits chimiques dans le condensat	Non disponible	Jugement d'experts basé sur l'approche floue
EB27	Missile (effet domino)	Disponible	1,6E-05

4.1.1 Elaboration du questionnaire

Les événements pour lesquels aucune probabilité de défaillance n'est disponible ont été évalués à l'aide d'un questionnaire structuré, reposant principalement sur les jugements d'experts (voir Annexe). Ce questionnaire, transmis par courrier électronique, invitait les participants à estimer la probabilité de survenance de certains événements à partir d'une échelle qualitative. Conformément au tableau 4.6 du chapitre 4, les réponses devaient être indiquées en cochant l'une des modalités suivantes : Très Faible (TF), Faible (F), Assez Faible (AF), Moyenne (M), Assez Élevée (AE), Élevée (E), Très Élevée (TE). Cette méthode permet de recueillir l'appréciation des experts sur la probabilité de défaillance, en fonction de leur niveau de connaissance. Le questionnaire utilisé présente une structure rigoureuse, bien adaptée à l'évaluation experte des probabilités liés à la défaillance des composantes du système de stockage de condensat de gaz naturel, à savoir:

- **Clarté et contextualisation** : L'introduction du questionnaire expose de manière précise le cadre technique de l'étude, en spécifiant le type d'équipement concerné, les normes de référence ainsi que les conditions climatiques locales. Cette contextualisation initiale oriente efficacement les experts et garantit la pertinence et la cohérence de leurs jugements.
- **Structuration des réponses** : Le recours à des questions fermées à échelle graduée à sept modalités, allant de "Très faible" à "Très élevé" permet une quantification précise des perceptions des experts en termes de probabilité.
- **Ouverture à l'expression qualitative** : Chaque question fermée est systématiquement suivie d'un espace réservé aux commentaires libres. Cette disposition offre aux experts la possibilité de justifier ou nuancer leurs évaluations, enrichissant ainsi l'analyse par une autre dimension.
- **Collecte de données sociodémographiques** : Le questionnaire intègre des éléments relatifs au profil des participants (âge, niveau de diplôme, expérience professionnelle, poste occupé), permettant des croisements analytiques entre les évaluations fournies et les caractéristiques individuelles des experts, ce qui renforce la robustesse et la portée des conclusions.
- **Support visuel explicatif** : L'insertion d'un schéma descriptif du système étudié constitue un atout majeur. Ce support visuel facilite la compréhension des interactions techniques en jeu et améliore ainsi la qualité des réponses, en réduisant les ambiguïtés d'interprétation.

4.1.2 Jugement d'experts et pondération

(a) Sélection des experts

Afin de garantir la fiabilité et la pertinence des jugements d'experts mobilisés dans l'évaluation des événements de défaillance incertains, une sélection rigoureuse a été effectuée selon des critères précis. La sélection de l'échantillon d'experts s'est appuyée sur la diversité des profils en termes de formation, de connaissance opérationnelle des systèmes et de familiarité avec l'environnement de travail étudié et sur .

Le tableau 5.4 présente les caractéristiques de 15 experts sollicités, selon cinq axes principaux : l'âge, le diplôme, l'expérience professionnelle, ainsi que l'établissement et le poste occupé. L'analyse de ce tableau révèle une composition équilibrée et multidisciplinaire :

- *Âge et expérience* : Le groupe d'experts présente une large variation d'âges (de 27 à 63 ans) et de niveaux d'expérience (de moins de 5 ans à plus de 30 ans), traduisant une complémentarité entre jeunes professionnels et spécialistes aguerris.
- *Formation académique* : La majorité des participants sont titulaires d'un diplôme d'ingénieur, mais la présence de détenteurs de master, de licence, ainsi qu'un professeur d'université, reflète une diversité de niveaux académiques favorisant l'enrichissement des points de vue.
- *Secteurs d'activité* : Les experts proviennent de différents milieux professionnels: sociétés pétrolières et gazières, bureaux d'études, compagnies d'assurance et institutions académiques, ce qui permet une confrontation des approches industrielles, techniques et théoriques.
- *Postes occupés* : Les fonctions exercées sont variées, allant d'ingénieur en risque industriel à directeur de laboratoire, chef de département ou coordinateur HSE (hygiène et sécurité industriel). Cette hétérogénéité fonctionnelle assure une prise en compte large des problématiques de sécurité industrielle.

La pluralité des profils ainsi constitués confère à l'étude une richesse d'analyse dans l'estimation des probabilités de défaillance pour les événements ne disposant pas de données empiriques.

(b) Pondération des experts

Une fois l'expertise finalisée, le facteur de pondération attribué à chaque expert a été déterminé, comme détaillé dans la section 6.2.2 du chapitre 4, en s'appuyant sur la méthode FAHP de Chang ainsi que sur sa version modifiée (M-FAHP), conformément aux équations présentées précédemment (Eq. 4.2 à Eq. 4.6, et Eq. 4.13) du même chapitre. Ce facteur traduit la qualité relative des experts (poids relative à chaque expert), dans la mesure où leurs appréciations d'un même événement de base peuvent varier, influençant ainsi les évaluations subjectives du risque.

Suite à la technique de comparaison et d'évaluation par paires, développée à partir de mon propre jugement et fondée sur l'échelle présentée dans le tableau 4.7 pour exprimer l'importance relative entre chaque paire, les matrices d'évaluation floues ont été construites ainsi que les poids finaux des experts ont été estimés selon les étapes suivantes :

- **Étape 1** : Une matrice d'évaluation floue par paires est construite pour les cinq critères considérés (*âge, diplôme, expérience, établissement, poste occupé*). Il s'agit d'une matrice de dimension 5×5 , dont les éléments sont des nombres flous triangulaires (NFT), permettant ainsi d'exprimer l'importance relative de chaque critère par rapport aux autres.

À partir de cette matrice, un vecteur de dimension 5×1 est obtenu, dont les cinq éléments représentent les poids attribués à chaque critère.

Tableau 5.4 Critères des experts et leurs poids calculés correspondants

	Âge	Diplôme	Expérience	Établissement	Poste occupé	Poids (FAHP-EAM)	Poids (M-FAHP-EAM)
E1	28	In-génieur	≤ 5 ans	Assurance	Ingénieur en risque industriel	0	0.0405
E2	57	Professeur	20 - 29 ans	Université	Directeur de laboratoire de recherche en sécurité	0.3965	0.1595
E3	27	In-génieur	≤ 5 ans	Assurance	Ingénieur en risque industriel	0	0.0334
E4	50	Master	10 - 19 ans	Société pétrolière et gazière	Chef du département sécurité	0.1297	0.0813
E5	56	In-génieur	20 - 29 ans	Société pétrolière et gazière	Directeur de l'école supérieure de pétrochimie	0.2191	0.1145
E6	29	In-génieur	≤ 5 ans	Bureau d'études	Ingénieur en risque industriel	0	0.0458
E7	42	Licence	10 - 19 ans	Bureau d'études	Consultant HSE	0	0.0528
E8	28	In-génieur	≤ 5 ans	Assurance	Ingénieur en risque industriel	0	0.0348
E9	27	In-génieur	≤ 5 ans	Assurance	Chef de projet senior	0	0.0303
E10	34	In-génieur	6 - 9 ans	Société pétrolière et gazière	Ingénieur environnement	0.0336	0.0664
E11	31	In-génieur	≤ 5 ans	Société pétrolière et gazière	Ingénieur HSE	0.0336	0.0599
E12	32	In-génieur	6 - 9 ans	Société pétrolière et gazière	Ingénieur HSE	0.0336	0.0599
E13	26	Magister	≤ 5 ans	Université	Coordinateur HSE Énergie	0.0869	0.0843
E14	33	In-génieur	≤ 5 ans	Société pétrolière et gazière	Ingénieur HSE	0.0336	0.0704
E15	34	In-génieur	≤ 5 ans	Société pétrolière et gazière	Chef du département environnement	0.0336	0.0664

- **Étape 02 :** Au second niveau de la procédure décisionnelle, une comparaison floue par paires des experts a été effectuée pour chacun des critères. Cette phase a permis de construire cinq matrices de comparaison floues avec des éléments en NFT, chacune de dimension 15×15 , correspondant aux cinq critères d'évaluation (âge, diplôme, expérience, établissement, poste occupé).

Le résultat de cette étape est une matrice de dimension 5×15 , dans laquelle chaque colonne représente le vecteur de poids associé à chaque expert pour un critère donné. Ainsi, chaque élément de la colonne j correspond au poids du j -ème expert selon le critère i .

A noter que chacune des deux étapes sont traitées conformément à :

- (a) La méthode FAHP-EAM décrite dans la section (a) du 6.2.2 du chapitre 4.
- (b) La méthode M-FAHP-EAM décrite dans la section (b) du 6.2.2 du même chapitre.

À titre d'exemple, le tableau 5.5 présente une application concrète des deux approches méthodologiques, FAHP-EAM et M-FAHP-EAM, pour le calcul du poids global attribué à un

expert (ici, *E2*). Les résultats montrent que, pour les deux méthodes (FAHP-EAM et FAHP-EAM modifiée), l'ordre d'importance des critères reste identique : *diplôme*, *établissement*, *âge*, *expérience*, puis *poste occupé*. Cela témoigne de la cohérence des jugements experts, indépendamment de la méthode utilisée.

Les résultats mettant en évidence une limite de la méthode FAHP-EAM : elle peut attribuer un poids nul ou quasi nul à un critère (par exemple, le critère *établissement* avec un poids de zéro), ce qui revient à l'exclure totalement de la décision, bien qu'il ait été initialement retenu dans l'analyse. Ce phénomène reflète la logique du raisonnement flou, dans lequel un critère jugé systématiquement moins important que les autres peut se voir attribuer une importance nulle. Un autre exemple, certains poids d'experts comme montre le tableau 5.4 estimés à l'aide de la méthode FAHP-EAM sont nuls. Cela signifie que leurs avis concernant les probabilités de défaillance des événements de base (EB) ne sont pas pris en compte dans le processus décisionnel, en raison de l'exclusion d'un ou plusieurs critères, ce qui peut entraîner des décisions erronées.

À l'inverse, la méthode modifiée (M-FAHP-EAM) corrige ce biais en attribuant à chaque critère un poids minimal strictement positif, même lorsque son importance relative est faible. Cette démarche garantit la prise en compte de tous les critères dans le calcul final des pondérations, offrant ainsi une approche plus équilibrée et plus représentative des situations réelles, où aucun critère ne peut être considéré comme totalement négligeable. En évitant l'exclusion automatique de certains critères, M-FAHP-EAM permet une évaluation plus complète et fidèle à la complexité des processus décisionnels.

Le poids de chaque expert, calculé selon les deux démarches méthodologiques, est présenté dans le tableau 5.4. les experts E2 et E5 par exemple obtiennent les poids les plus élevés par rapport aux autres. Ce résultat s'explique par leur expérience dans le domaine, leur niveau de formation, ainsi que leur poste occupé au sein de leurs entreprises respectives.

Le coefficient de corrélation de Bravais-Pearson obtenu entre les poids calculés par les deux méthodes est de 0,96, indiquant une forte corrélation positive (voir figure 5.5). Cela montre que les deux approches conduisent à des pondérations globalement cohérentes, tout en permettant à la méthode modifiée d'éviter le biais d'attribution de poids nuls.

Tableau 5.5 | Poids de l'expert E2

Critères (Ci)	FAHP-EAM			FAHP-EAM Modifié		
	Poids du Critère ($W_{(Ci)}$)	Poids de l'Expert ($W_{(E2/Ci)}$)	Poids de E2	Poids du Critère ($W_{(Ci)}$)	Poids de l'Expert ($W_{(E2/Ci)}$)	Poids de E2
Âge	0,2229	0,3963		0,2057	0,1815	
Diplôme	0,2966	0,7069		0,2856	0,2455	
Expérience	0,2031	0,3772	0,3965	0,1885	0,1759	0,1595
Établissement	0,2349	0		0,2208	0,0098	
Poste occupé	0,0424	0,5149		0,0993	0,1925	

4.1.3 Agrégation des avis des experts

Le tableau 5.6 présente les réponses fournies par chaque expert (E1 à E15) pour l'évaluation de différentes questions relatives aux événements de base, représentées ici par les identifiants EB11 à EB26. Les jugements ont été exprimés à l'aide d'une échelle linguistique floue comme expliquer dans la section (b) du 6.2.1, (TF – Très faible, F – Faible, AF – Assez faible, M – Moyen, AE – Assez élevé, E – Élevé, TE – Très élevé), traduisant l'intensité perçue de chaque

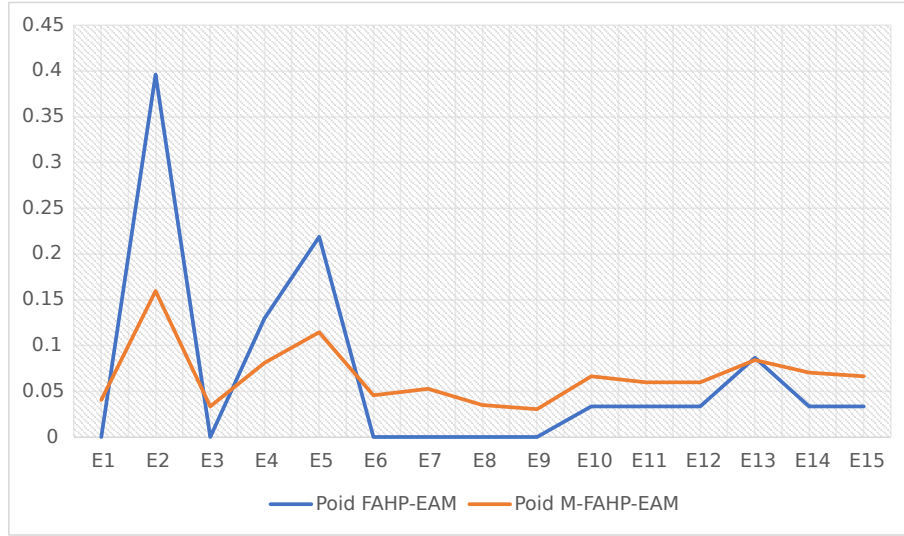


Figure 5.5 | Schématisation entre les deux graphes des poids des experts selon les deux techniques

Tableau 5.6 | Résultat du jugement des experts

	EB11	EB12	EB15	EB16	EB17	EB19	EB21	EB22	EB23	EB24	EB26
E1	TF	TF	AF	M	AF	F	AE	AE	E	AE	E
E2	AF	M	F	M	AE	M	M	E	E	E	E
E3	M	TE	F	E	TF	M	TE	E	TE	E	E
E4	TF	TF	TF	TF	F	E	TE	E	TE	TE	E
E5	E	TF	AF	AF	F	M	E	AE	AE	AE	AF
E6	TF	F	AF	M	AE	F	M	AF	TF	AF	M
E7	AF	AE	AF	M	AE	AE	TE	TE	TE	TE	E
E8	AF	E	AF	TE	M	TE	E	TE	AE	TE	M
E9	AF	E	M	E	TE	E	TE	E	E	TE	AE
E10	TF	F	F	AF	F	M	AE	M	AE	M	AE
E11	TF	F	F	M	AE	F	E	AE	E	E	AE
E12	TF	TF	F	F	F	TF	E	TE	TE	TE	E
E13	F	AF	M	F	M	F	E	AE	AE	E	M
E14	TF	TF	TF	TF	AF	TF	TE	TE	TE	TE	TE
E15	F	E	F	M	M	AE	F	M	TF	TF	E

événement. Ce tableau constitue donc la base des évaluations floues utilisées dans l'analyse, chaque cellule reflétant l'opinion individuelle d'un expert sur un événement donné. Il permet d'illustrer la diversité des jugements ainsi que la subjectivité des appréciations selon les profils des experts consultés.

Les estimations subjectives individuelles des experts pour un événement de base (EB) donné, exprimées à l'aide de termes linguistiques, sont ensuite converties en nombres flous trapézoïdaux, conformément à la procédure décrite dans la section (d) du 6.2.1 du chapitre précédent, et en s'appuyant sur l'échelle de conversion présentée dans le tableau 4.6. Une fois cette étape accomplie, les jugements de l'ensemble des experts concernant un même événement de base

sont agrégés en appliquant la méthodologie des sections (a), (b), et (c) du 6.2.3 du chapitre précédent. Ce processus est répété pour chaque EB pris en considération.

Pour illustrer la méthodologie utilisée dans cette étude, la probabilité de défaillance du EB15: “Défaillance du système de réfrigération à la demande”, a été choisi comme exemple d’estimation comme suite:

1. Aggrégation des avis d’experts (Similarity Aggregation Method-SAM):

- Conformément aux données présentées dans le tableau 5.6 et aux équations 4.7 à 4.8 du chapitre 4, le degré de similarité (ou d’accord) a été évalué. Étant donné le nombre élevé de fonctions de similarité utilisées (au total 225), seule une sélection représentative est fournie dans le tableau 5.7. Il convient donc de préciser que ces degrés de similarité constituent les éléments de la matrice d’accord.
- Dans l’étape suivante, à l’aide des équations 4.9 à 4.12 du chapitre précédent, le degré moyen d’accord ($AA(Ei)$), le degré d’accord relatif ($RA(Ei)$), le coefficient de consensus ($CCD(Ei)$) (pondéré par les poids des experts obtenus via les deux résultats du FAHP-EA et M-FAHP-EA, respectivement, voir tableau 5.4), ainsi que le nombre flou trapézoïdal global représentant l’opinion combinée des experts concernant l’événement de base EB15 ont été calculés. Les résultats correspondants sont présentés dans le tableau 5.8.

2. Défuzzification du jugement agrégé des experts (Center Of Area-COA):

- La méthode du centre de gravité (COA) est utilisée à ce niveau pour fournir un résultat pertinent pour la prise de décision à partir d’un ensemble de possibilités floues associées aux événements de base. Pour l’EB15, en appliquant l’équation 4.14 du chapitre précédent, le nombre flou trapézoïdal global représentant l’opinion combinée des experts concernant cet événement de base est transformé en possibilité floue de l’ordre de 0,7233.

3. Transformation des possibilités floues en probabilités de défaillance:

- Afin d’atteindre l’objectif de notre étude, l’équation 4.18 du chapitre 4 proposée par Onisawa a été adoptée pour déterminer la probabilité de défaillance correspondante de l’EB15, laquelle a été calculée à 0,0054 à partir de la valeur de la possibilité floue. Ainsi, les probabilités finales de défaillance pour l’ensemble des EB dont les taux de défaillance sont inconnus ont été déterminées, comme présenté dans le tableau 5.9.

Les tableaux 5.9 et 5.10 présentent les résultats agrégés des jugements d’experts concernant les événements de base (EB) à taux de défaillance inconnu, selon deux approches de pondération des experts: la méthode FAHP-EAM et sa version modifiée M-FAHP-EAM.

- Sur le plan des possibilités floues, les valeurs obtenues avec M-FAHP-EAM sont généralement légèrement inférieures ou très proches de celles issues de FAHP-EAM

pour plusieurs événements (exp : BE11 avec 0,2454 contre 0,2878, BE15 avec 0,2659 contre 0,2589). Cela reflète une prise en compte plus équilibrée et nuancée des jugements d'experts.

- Concernant les probabilités de défaillance calculées via l'équation d'Onisawa, la méthode M-FAHP-EAM produit des valeurs souvent plus faibles pour les événements à faible criticité (BE11, BE15), et légèrement plus élevées pour ceux à criticité élevée (BE16 à BE24). Cette tendance indique une meilleure différenciation des événements selon leur niveau réel de risque.
- La méthode modifiée corrige également certaines limitations de FAHP-EAM, notamment la possibilité que certains experts aient un poids nul. M-FAHP-EAM intègre ainsi les jugements de tous les experts de manière pondérée par critère, ce qui renforce la représentativité globale des résultats.
- Les événements les plus critiques (BE21 à BE24) conservent une position dominante dans les deux classements, bien que leur ordre relatif varie légèrement (exp : BE24 est le plus critique selon FAHP-EAM, alors que BE21 l'est selon M-FAHP-EAM). De même, les événements les moins critiques (BE11, BE15) restent en bas du classement, avec une inversion d'ordre : BE15 est le moins critique avec FAHP-EAM, alors que c'est BE11 avec M-FAHP-EAM.

Tableau 5.7 | Degré de similarité entre chaque paire d'experts

S(Ei,Ej)	Valeur	S(Ei,Ej)	Valeur	.	.	.	S(Ei,Ej)	Valeur
S(E1,E1)	1	S(E2,E1)	0.7250	.	.	.	S(E15,E1)	0.8750
S(E1,E2)	0.7250	S(E2,E2)	1	.	.	.	.	.
S(E1,E3)	0.5750	S(E2,E3)	0.85	.	.	.	.	.
S(E1,E4)	1	S(E2,E4)	0.7250	.	.	.	.	.
S(E1,E5)	0.2750	S(E2,E5)	0.55	.	.	.	.	.
S(E1,E6)	1	S(E2,E6)	0.7250	.	.	.	.	.
S(E1,E7)	0.7250	S(E2,E7)	1	.	.	.	.	.
S(E1,E8)	0.7250	S(E2,E8)	1	.	.	.	.	.
S(E1,E9)	0.7250	S(E2,E9)	1	.	.	.	.	.
S(E1,E10)	1	S(E2,E10)	0.7250	.	.	.	.	.
S(E1,E11)	1	S(E2,E11)	0.7250	.	.	.	.	.
S(E1,E12)	1	S(E2,E12)	0.7250	.	.	.	.	.
S(E1,E13)	0.8750	S(E2,E13)	0.85	.	.	.	.	.
S(E1,E14)	1	S(E2,E14)	0.7250	.	.	.	.	.
S(E1,E15)	0.8750	S(E2,E15)	0.85	.	.	.	S(E15,E15)	1

4.1.4 Comparaison de la probabilité de rupture avec les valeurs de référence

Une fois l'évaluation qualitative de l'ADD effectuée, une analyse quantitative a été réalisée. La probabilité d'occurrence d'une rupture catastrophique du réservoir de stockage a été estimée à 0,057 pour un million d'heures de fonctionnement, soit environ 0,000499 par an. Cela signifie qu'en moyenne, il existe moins d'une chance sur deux mille (0,05%) qu'une rupture catastrophique se produise au cours d'une année donnée. Bien que cette probabilité puisse paraître relativement faible, il est important de rappeler que, dans le contexte du stockage d'hydrocarbures, même une faible probabilité de défaillance peut avoir des conséquences graves en termes

Tableau 5.8 | Nombre flou trapézoïdal combiné de EB15

Ex-perts	BE15	AA (Ei)	RA (Ei)	CCD (Ei)	R (E1,.....,E15)
E1	(0,2 0,3 0,4 0,5)	4.4167	0.0683	0.0544	(0,1528 0,2391 0,2843 0,3843)
E2	(0,1 0,2 0,2 0,3)	4.4667	0.0691	0.1143	
E3	(0,1 0,2 0,2 0,3)	4.4667	0.0691	0.0512	
E4	(0 0 0,1 0,2)	4.0083	0.0620	0.0717	
E5	(0,2 0,3 0,4 0,5)	4.4167	0.0683	0.0914	
E6	(0,2 0,3 0,4 0,5)	4.4167	0.0683	0.0571	
E7	(0,2 0,3 0,4 0,5)	4.4167	0.0683	0.0605	
E8	(0,2 0,3 0,4 0,5)	4.4167	0.0683	0.0515	
E9	(0,4 0,5 0,5 0,6)	3.8667	0.0598	0.0450	
E10	(0,1 0,2 0,2 0,3)	4.4667	0.0691	0.0677	
E11	(0,1 0,2 0,2 0,3)	4.4667	0.0691	0.0645	
E12	(0,1 0,2 0,2 0,3)	4.4667	0.0691	0.0645	
E13	(0,4 0,5 0,5 0,6)	3.8667	0.0598	0.0721	
E14	(0 0 0,1 0,2)	4.0083	0.0620	0.0662	
E15	(0,1 0,2 0,2 0,3)	4.4667	0.0691	0.0677	

Tableau 5.9 | Résumé des résultats obtenus pour les événements de base avec un taux de défaillance inconnu sur la base des poids obtenu par FAHP-EAM

Événement de base	Résultat agrégé du jugement des experts	Possibilité floue	Probabilité de défaillance
BE11	(0.1779 0.2408 0.3129 0.4129)	0.2878	0.0008
BE12	(0.2399 0.3032 0.3559 0.4536)	0.3399	0.0013
BE15	(0.1468 0.2330 0.2764 0.3764)	0.2589	0.0005
BE16	(0.2986 0.3853 0.4198 0.5174)	0.4059	0.0024
BE17	(0.3190 0.4161 0.4667 0.5644)	0.4416	0.0032
BE19	(0.3579 0.4453 0.4716 0.5690)	0.4616	0.0038
BE21	(0.6139 0.7139 0.7496 0.8223)	0.7233	0.0214
BE22	(0.6174 0.7174 0.7689 0.8499)	0.7374	0.0234
BE23	(0.6336 0.7286 0.7932 0.8639)	0.7537	0.0260
BE24	(0.6499 0.7467 0.8025 0.8694)	0.7656	0.0281
BE26	(0.5725 0.6725 0.7036 0.7988)	0.6865	0.0169

de santé des travailleurs, de sécurité des procédés, d'impact environnemental, et de pertes financières pour l'entreprise. Ainsi, même les probabilités de défaillance relativement faibles doivent être prises au sérieux et faire l'objet d'une gestion rigoureuse.

Cette valeur est notablement plus élevée que les fréquences généralement rapportées dans la littérature pour un événement similaire sur un réservoir atmosphérique à simple confinement. Afin de mettre ce résultat en perspective, nous l'avons comparé à plusieurs valeurs de référence issues notamment du rapport INERIS [Lenoble and Deust, 2009] et du rapport ARAMIS [Delvosalle et al., 2004a]. Ces documents présentent des classes de fréquences établies à partir de diverses bases de données, incluant des retours d'expérience, des analyses statistiques et des expertises sectorielles. Les données de référence correspondent à des probabilités de survenance d'une rupture catastrophique consécutive à l'apparition d'une brèche de taille variable, à savoir :

- Fuite correspondant à 10 mm de brèche : $1,0 \times 10^{-4}$

Tableau 5.10 | Résumé des résultats obtenus pour les événements de base avec un taux de défaillance inconnu sur la base des poids obtenu par M-FAHP-EAM

Événement de base	Résultat agrégé du jugement des experts	Possibilité floue	Probabilité de défaillance
BE11	(0.1411 0.1954 0.2686 0.3686)	0.2454	0.0005
BE12	(0.2496 0.3138 0.3674 0.4634)	0.3501	0.0015
BE15	(0.1528 0.2391 0.2843 0.3843)	0.2659	0.0006
BE16	(0.3167 0.4034 0.4371 0.5329)	0.4231	0.0028
BE17	(0.3129 0.4084 0.4589 0.5550)	0.4339	0.0031
BE19	(0.3345 0.4168 0.4517 0.5475)	0.4384	0.0032
BE21	(0.6259 0.7259 0.7686 0.8380)	0.7379	0.0235
BE22	(0.6033 0.7033 0.7611 0.8371)	0.7250	0.0216
BE23	(0.6113 0.7024 0.7731 0.8406)	0.7308	0.0224
BE24	(0.6313 0.7265 0.7886 0.8508)	0.7478	0.0250
BE26	(0.5751 0.6751 0.7082 0.8017)	0.6896	0.0172

- Fuite correspondant à 35 mm de brèche : $1,8 \times 10^{-5}$
- Fuite de 50 mm en 10 minutes : $5,0 \times 10^{-6}$
- Fuite de 100 mm : $1,2 \times 10^{-5}$
- Fuite instantanée : $5,0 \times 10^{-6}$

La probabilité annuelle de rupture catastrophique estimée dans notre étude est environ cinq fois supérieure à la fréquence associée à une fuite de 10 mm rapportée dans la littérature, et dépasse de plusieurs ordres de grandeur celles correspondant à des brèches de plus grande taille.

Ce résultat peut sembler surprenant au premier abord, mais il s'explique par la vulnérabilité structurelle du système étudié et par l'intégration d'un grand nombre d'événements de base (EB) dans la modélisation. Ces événements couvrent un large spectre de causes techniques, organisationnelles, humaines et environnementales dont certaines présentent des fréquences non négligeables (voir tableau 5.11). Cette approche systémique vise à refléter la complexité réelle d'un réservoir de stockage d'hydrocarbures dans un site industriel et les multiples facteurs pouvant interagir en situation dégradée.

Il est essentiel de souligner que dans un contexte aussi vulnérable, une fuite de 10 mm ne constitue pas nécessairement un événement bénin. En effet, la présence simultanée de plusieurs défaillances peut transformer cet incident mineur en un scénario domino menant à une rupture catastrophique. Ce n'est donc pas la brèche isolée qui déclenche l'accident majeur, mais l'échec des barrières de sécurité censées contenir ses effets.

Par exemple, une fuite de 10 mm non détectée (EB5), sur un fond de réservoir affaibli par la corrosion (EB25), combinée à une surcharge due à une pompe bloquée (EB4) ou à une perte d'alimentation électrique (EB7), et aggravée par une erreur humaine (EB14), peut provoquer une perte de stabilité progressive du réservoir, puis sa rupture brutale. Ce type de scénario illustre clairement comment l'accumulation de défaillances mineures peut déboucher sur un accident majeur, en l'absence de barrières de sécurité efficaces.

Ce résultat souligne l'importance d'une revue approfondie des dispositifs de prévention et de protection, ainsi que la nécessité d'actions correctives pour réduire la probabilité de rupture à un niveau acceptable.

Tableau 5.11 | Événements de base contribuant à la rupture catastrophique d'un réservoir de stockage de condensat

Catégorie	EB concernés	Mécanisme aggravant
Défaillances techniques	EB1, EB3, EB4, EB5, EB6, EB8, EB10, EB13, EB23, EB24, EB25	La fuite peut passer inaperçue ou s'aggraver faute de détection ou de réparation.
Défaillance du système de contrôle	EB2, EB9, EB14	Le système ne réagit pas correctement (pas de signal d'alerte, erreurs humaines).
Défaillance de sécurité passive ou active	EB7, EB11, EB15	Les systèmes de secours ne se déclenchent pas.
Facteurs externes aggravants	EB16, EB17, EB19, EB20, EB21, EB22, EB26, EB27	Réchauffement, séismes, corrosion, erreurs de fabrication ou effet domino peuvent fragiliser davantage la structure.

4.1.5 Ensembles de coupes minimales

Après l'identification des données relatives aux événements de base (EB), une analyse qualitative est abordée. L'analyse qualitative a consisté à générer les ensembles de coupures minimales (MCS). Un MCS représente un EB unique ou une combinaison de plusieurs EB reliés par des portes logiques, pouvant conduire à une défaillance du système ou à un événement critique.

Le tableau 5.12 présente les résultats des ensembles de coupure minimaux (MCS) identifiés dans l'analyse de fiabilité du système de stockage. On observe que la majorité des ensembles critiques sont de rang 1, ce qui signifie que la défaillance d'un seul événement élémentaire suffit à entraîner un scénario de défaillance majeur.

Plus précisément, l'événement élémentaire **BE14** occupe le premier rang avec une contribution dominante de **87,16 %**, ce qui en fait le facteur critique principal dans la dégradation du système. Il est suivi, mais de loin, par **BE19** (5,58 %) et **BE13** (3,14 %). Ces trois événements totalisent à eux seuls plus de 95 % de la contribution au risque, ce qui justifie une attention particulière à leur fiabilité et à leur maintenance préventive.

Les MCS de rang supérieur (ordre 2 et 3), bien que présents, ont une contribution négligeable. Par exemple, le MCS **BE11.BE12** (ordre 2) ne contribue qu'à hauteur de **1,3E-03 %**, tandis que l'ensemble de rang 3 **BE25.BE26.BE27** affiche une contribution de seulement **2,7E-7 %**. Ces résultats confirment que le système est principalement vulnérable à des défaillances d'ordre simple, et que les défaillances combinées ont un impact marginal dans le scénario étudié. Par ailleurs, cinq MCN incluent l'événement de base **BE27**. Par conséquent, des mesures préventives spécifiques à celui-ci sont nécessaires.

Cette hiérarchisation permet d'orienter efficacement les efforts de gestion des risques et les actions de maintenance vers les composants les plus influents du système.

4.1.6 Mesures d'importance

Dans le cadre de l'évaluation de la criticité des événements de base, le facteur d'importance de criticité (CIF) permet de mesurer la contribution de chaque EB à l'occurrence de l'événement

Tableau 5.12 | Résultats des ensembles de coupure minimaux

Rang	Ordre	Pourcentage	MCS
1	1	87.16	BE14
2	1	5.58	BE19
3	1	3.14	BE13
4	1	1.61	BE3
5	1	1.05	BE18
6	1	0.76	BE4
7	1	0.33	BE2
8	1	0.28	BE1
9	1	0.09	BE5
10	2	1.3E-03	BE11.BE12
11	2	7E-4	BE24.BE27
12	2	6.6E-4	BE21.BE27
13	2	6.3E-4	BE23.BE27
14	2	6E-4	BE22.BE27
15	1	3.1E-4	BE20
16	3	2.7E-7	BE25.BE26.BE27

critique. Selon les résultats présentés dans le tableau 5.13, l'EB14, relatif à l'erreur humaine, s'avère être le plus impactant, avec un CIF de 0,87. Cet événement inclut des erreurs telles que le mauvais remplissage du réservoir, l'oubli de matériel après intervention, une procédure de soudage incorrecte ou une intervention malveillante. En conséquence, il est recommandé d'améliorer les performances des opérateurs par des formations et des contrôles renforcés.

Viennent ensuite les événements EB19 (erreur de conception ou de mise en œuvre) et EB13 (défaut de maintenance), avec des ICR respectifs de 0,053 et 0,03. Les autres événements ont un impact marginal. Cette hiérarchisation permet de cibler efficacement les mesures de réduction des risques, en priorisant les interventions sur les facteurs humains et les processus de conception. La concordance entre les valeurs issues du réseau bayésien et l'arbre de défaillance valide également l'utilisation de modèles hybrides pour l'analyse des risques.

En outre, selon le Tableau 5.13, parmi les EB estimés à l'aide des jugements d'experts et de la théorie des ensembles flous, l'EB19 présente une valeur d'importance particulièrement significative, contribuant davantage à l'occurrence de l'événement redouté que les autres EB (BE11, BE21, BE22, BE23, etc.). C'est pourquoi la probabilité de défaillance de l'EB19 a été choisie pour être variée, afin de démontrer la pertinence de l'approche adoptée dans notre étude pour obtenir une estimation plus précise et mieux gérer l'incertitude liée aux probabilités de défaillance.

Il ressort de la Figure 5.6 que la simple variation de la probabilité de défaillance de l'EB19 entraîne une variation d'environ 95 % de l'indisponibilité du système (la survenance de la rupture catastrophique). Ce résultat illustre l'importance critique de la gestion de l'incertitude concernant les données associées à l'EB19 dans le cadre de l'analyse par arbre de défaillance (ADD).

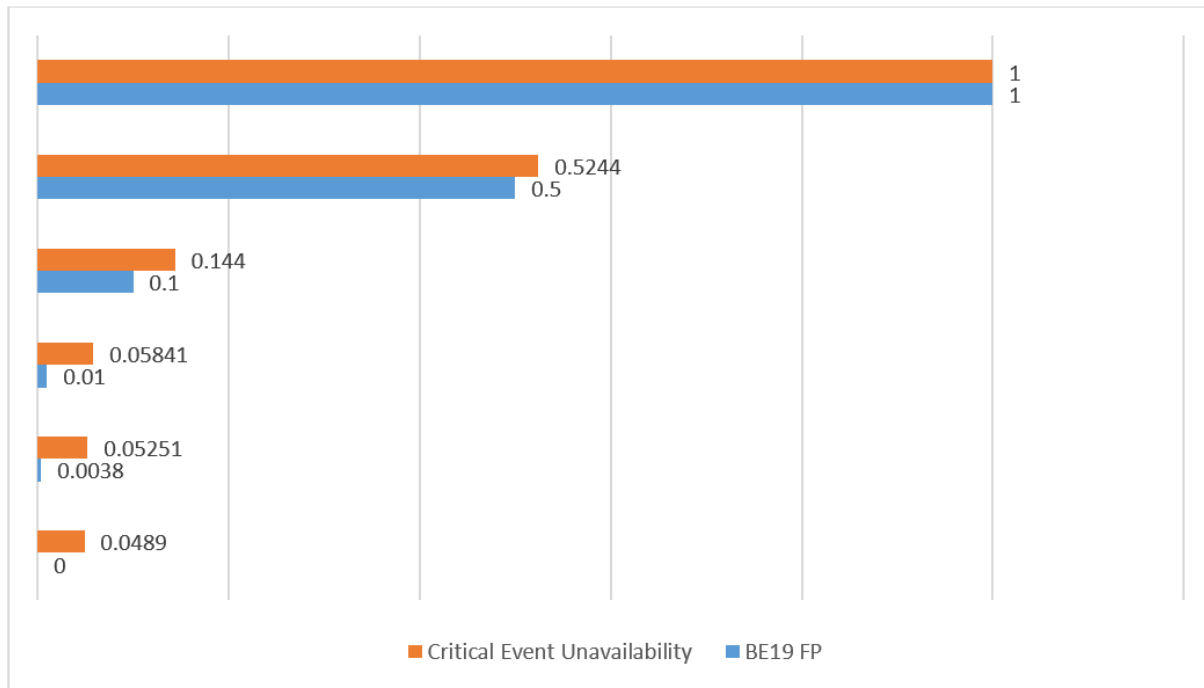


Figure 5.6 Variation de l'indisponibilité du système en fonction de la probabilité de défaillance de l'EB19

4.2 Quantification de l'ADE

4.2.1 Analyse dynamique de l'impact des causes

Au-delà de la structuration organisationnelle et analytique du Bow-tie (notamment sa partie liée à l'arbre de défaillance), les réseaux bayésiens permettent une analyse dynamique en suggérant des scénarios de défaillance. Pour valider le réseau bayésien (BN) développé, une comparaison de la probabilité de survenue de l'événement redouté obtenue par le Bow-Tie et celle générée par le BN a été effectuée. De plus, une comparaison des facteurs d'importance des événements de base (CIF) est présentée dans le Tableau 5.13. Les résultats issus de la méthode Bow-Tie (FTA) et ceux obtenus via le réseau bayésien montrent une parfaite concordance : le même événement critique est identifié avec des probabilités équivalentes pour l'ensemble des événements.

Les scénarios jouent un rôle central dans le calcul de la probabilité d'occurrence d'un événement spécifique, en fonction des valeurs prises par d'autres variables dans le réseau. Dans ce contexte, plusieurs scénarios ont été modélisés afin d'approfondir l'analyse.

Dans le scénario visant à évaluer la probabilité de l'événement redouté « Rupture catastrophique », les probabilités associées à chaque facteur contribuant permettent d'identifier les causes les plus critiques. Les événements de base (BE) les plus significatifs sont les suivants :

- Erreur humaine, avec une probabilité de 0,8775 ;
- Perte d'alimentation électrique, avec une probabilité de 0,1875 ;
- Erreur de conception, avec une probabilité de 0,05616.

Tableau 5.13 | Résultats d'importance

Événement de base	ICR BN	ICR ADD
BE14	0,87106	0,87110
BE19	0,05313	0,05313
BE13	0,02984	0,02990
BE3	0,01524	0,01525
BE18	0,00994	0,00998
BE4	0,00712	0,00720
BE2	0,00315	0,00316
BE1	0,00265	0,00266
BE27	0,00003	0,00002
BE5	0,00083	0,00081
BE12	0,00001	0,00001
BE11	0,00001	0,00001
BE24	0,00000	0,00001
BE23	0,00000	0,00001
BE22	0,00000	0,00001
BE21	0,00000	0,00001
BE20	0,00000	0,00000
BE25	0,00000	0,00000
BE26	0,00000	0,00000

4.2.2 Analyse des impacts environnementaux

Les deux scénarios suivants visent à analyser l'ampleur des impacts environnementaux découlant d'une « rupture catastrophique » d'un réservoir de condensat. Le premier scénario explore l'influence directe de certains événements de base critiques sur la probabilité de survenue de l'événement redouté ainsi que sur ses répercussions environnementales. En supposant l'occurrence de l'événement de base « erreur humaine » (probabilité de BE14 = Vrai), les résultats révèlent que la probabilité de survenue d'une rupture catastrophique atteint 91,15 %, tandis que la probabilité de formation d'une zone toxique s'élève à 63,8 %. Ce constat met en évidence l'effet domino pouvant résulter d'un simple écart humain, soulignant ainsi l'importance de renforcer les procédures de formation, de supervision et de vérification des interventions humaines.

Le second scénario considère une situation hypothétique dans laquelle l'événement critique (rupture catastrophique) se produit avec une probabilité de 100 %. L'objectif est d'identifier et de quantifier les conséquences environnementales associées. Les résultats indiquent que :

- la formation d'un nuage toxique survient dans 30 % des cas,
- une contamination atmosphérique significative est observée dans 49 % des cas, et
- une pollution du sol (zone toxique) apparaît avec une faible probabilité de 1,158E-3 %.

Ces résultats traduisent la gravité potentielle des impacts environnementaux en cas d'accident majeur. Le condensat, étant un hydrocarbure léger mais potentiellement dangereux, peut s'évaporer rapidement dans l'atmosphère en formant un nuage toxique ou s'infiltrer dans le sol, provoquant une contamination durable des milieux naturels. Ainsi, une telle rupture pourrait non seulement engendrer des dommages matériels et humains, mais également affecter durablement les écosystèmes environnants. Cette analyse justifie pleinement la mise en place

de mesures préventives rigoureuses, telles que des systèmes de confinement, des dispositifs de détection précoce et des plans de réponse environnementale.

4.2.3 Modélisation des effets

Le réservoir de stockage est équipé d'un bassin de rétention compact à sable, conçu pour contenir les fuites accidentelles de produits liquides. Le produit stocké est le condensat, un hydrocarbure léger résultant de la condensation des gaz naturels, principalement constitué de molécules comportant entre 5 et 15 atomes de carbone. Il est particulièrement volatil, inflammable et potentiellement toxique en cas de dispersion accidentelle. Pour les besoins de la modélisation, l'analyse s'est focalisée sur le composant majoritaire du mélange, à savoir le pentane (C_5H_{12}), en raison de sa représentativité et de sa contribution significative aux propriétés physico-chimiques globales du condensat, notamment en matière d'inflammabilité et de toxicité.

Parmi les paramètres ayant un impact déterminant sur les résultats des simulations de dispersion et des effets accidentels, les conditions météorologiques occupent une place centrale. Ainsi, afin de garantir une approche conservatrice, le scénario retenu correspond à un cas extrême, typique des périodes estivales : une température ambiante de 45 °C, une vitesse de vent constante de 6 m/s, une humidité relative de 20 % et une classe de stabilité atmosphérique « C », caractérisant une atmosphère modérément instable, favorable à la dispersion horizontale des polluants [MétéoAlgérie, 2024]. Ces conditions maximisent la volatilisation du produit, augmentent le rayon d'exposition aux effets thermiques et toxiques, et permettent ainsi d'appréhender les conséquences dans un cadre de sécurité maximal.

Enfin, afin d'évaluer les effets potentiels sur la santé humaine ainsi que les risques de propagation par effet domino sur les installations avoisinantes, les seuils de référence des effets physiques suivants ont été retenus : surpressions, effets thermiques et seuils de toxicité [MEDD-ENERIS, 2004].

Selon la Figure 5.7&5.8, les phénomènes dangereux résultants pouvant être simulés sont les suivants :

- Feu de nappe (*Poolfire*) ;
- Boule de feu (*Fireball*) ;
- Explosion de type VCE (Vapour Cloud Explosion) ;
- Rupture catastrophique / Effet BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion) ;
- Nuage toxique.

Les seuils de référence pour les effets physiques ont été définis en fonction des pressions de surpression, des effets thermiques et des seuils de toxicité afin d'évaluer les impacts sur la santé humaine et les effets dominos potentiels comme présenté dans la section 7.3.

A. Analyse des effets dominos

Les dommages mécaniques subis par les installations sont la conséquence directe des effets dominos. Ainsi, plusieurs fuites peuvent survenir au niveau des équipements affectés, en fonction de leur nature, entraînant l'inflammation immédiate des substances combustibles libérées.

- Rupture catastrophique (BLEVE)

Dans le cas d'une explosion de type BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion) résultant de la rupture catastrophique du réservoir (voir Figure 5.7(a)), les effets dominos peuvent affecter les équipements situés à des distances allant jusqu'à 994 mètres pour les installations protégées par un système de refroidissement, et jusqu'à 2092 mètres pour les installations non protégées. Tout équipement localisé dans ces rayons d'exposition est vulnérable à des dommages majeurs, susceptibles d'entraîner une perte de confinement de leur contenu, ce qui amplifierait les conséquences de l'accident initial par la génération d'incendies ou d'explosions secondaires. Compte tenu de l'étendue des distances d'impact couvrant une grande partie de l'installation, le risque est qualifié de critique.

- Explosion de type VCE

Comme le montre la Figure 5.8(f), les distances d'impact correspondant aux surpressions de 160 mbar et 300 mbar sont respectivement de 80 mètres et 62 mètres. Ces niveaux de surpression sont suffisants pour engendrer des effets dominos, notamment au niveau de trois réservoirs de stockage de condensat situés dans cette zone.

- Incendie de nappe (Pool fire)

Dans le scénario le plus défavorable, la distance d'impact correspondant à un rayonnement thermique de 8 kW/m^2 atteint 264 mètres, tandis que celle correspondant à 32 kW/m^2 est de 142 mètres (Figure 5.7(c)). Ces distances élevées s'expliquent notamment par les dimensions insuffisantes du système de rétention, incapable de contenir la totalité du volume du réservoir. Toutefois, les équipements exposés à ce rayonnement sont protégés par un système de refroidissement par eau (déluge) et d'extinction fixe. Par ailleurs, des moyens d'intervention mobiles viennent compléter les dispositifs fixes, permettant une réponse rapide et efficace en cas de déversement.

- Boule de feu (Fireball)

Comme illustré à la Figure 5.8(j), les distances d'impact associées à des intensités thermiques de 32 kW/m^2 et 8 kW/m^2 sont respectivement de 28 mètres et 49 mètres. Il est important de noter qu'en cas de boule de feu, aucun effet domino n'est à craindre sur les installations avoisinantes. Toutefois, ce phénomène représente un danger majeur pour les personnes, en raison de l'intensité thermique libérée dans un laps de temps très court.

B. Analyse des effets sur l'être humain

Dans le cadre de l'étude des effets thermiques sur les personnes, les données représentées à la Figure 5.7(b) illustrent les conditions les plus sévères consécutives à une rupture catastrophique du réservoir. Il ressort de cette analyse que la distance d'impact correspondant à un rayonnement thermique de 10 kW/m^2 atteint 1931 mètres. Cette valeur représente le rayon critique à l'intérieur duquel les individus sont exposés à une intensité thermique susceptible d'engendrer des brûlures graves, voire mortelles, en quelques dizaines de secondes d'exposition.

Par ailleurs, pour une intensité de rayonnement thermique plus modérée, de l'ordre de $2,5 \text{ kW/m}^2$, la distance d'impact s'étend jusqu'à 3,2 kilomètres. À ce niveau d'exposition, bien

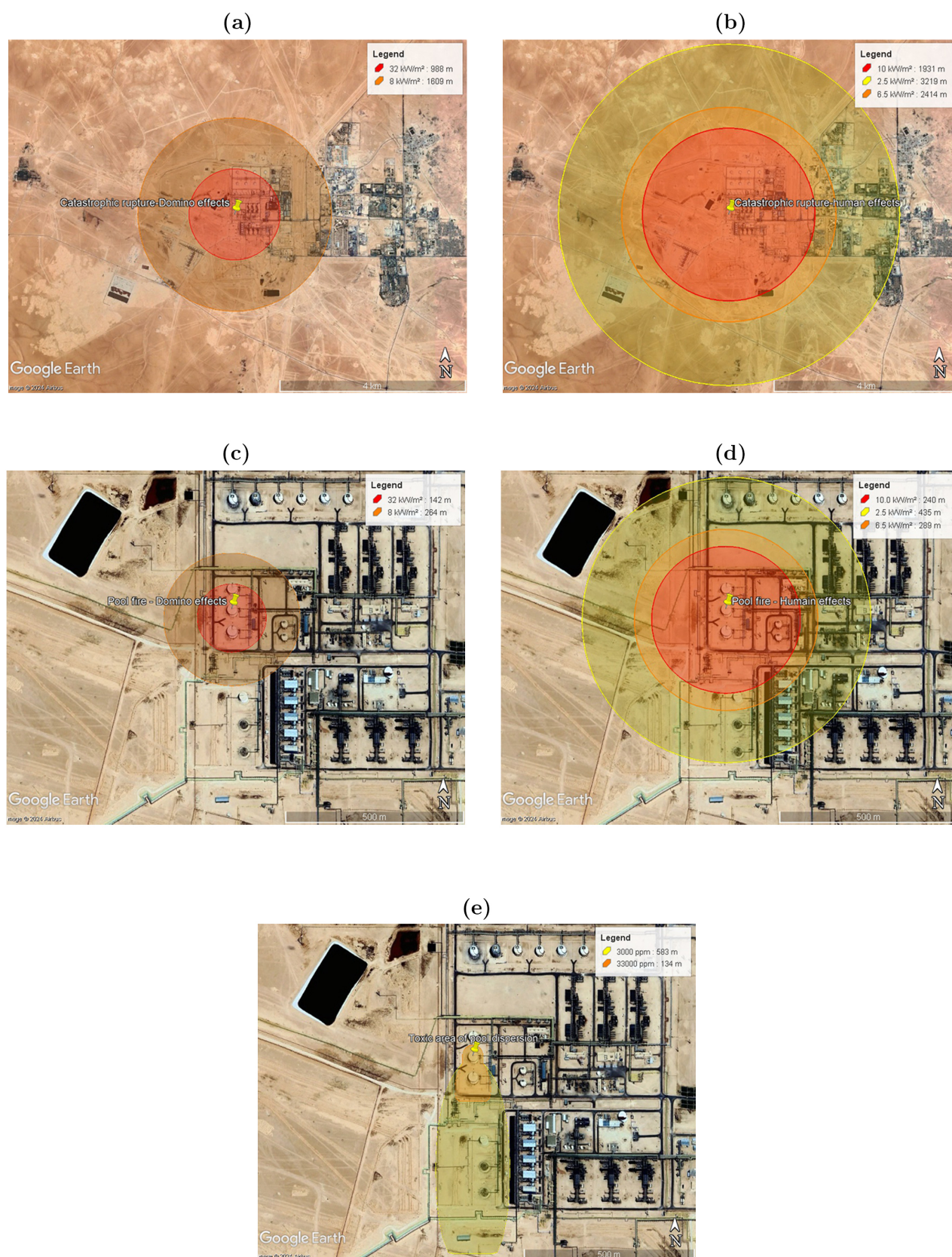


Figure 5.7 | Simulation des effets des phénomènes dangereux (1)

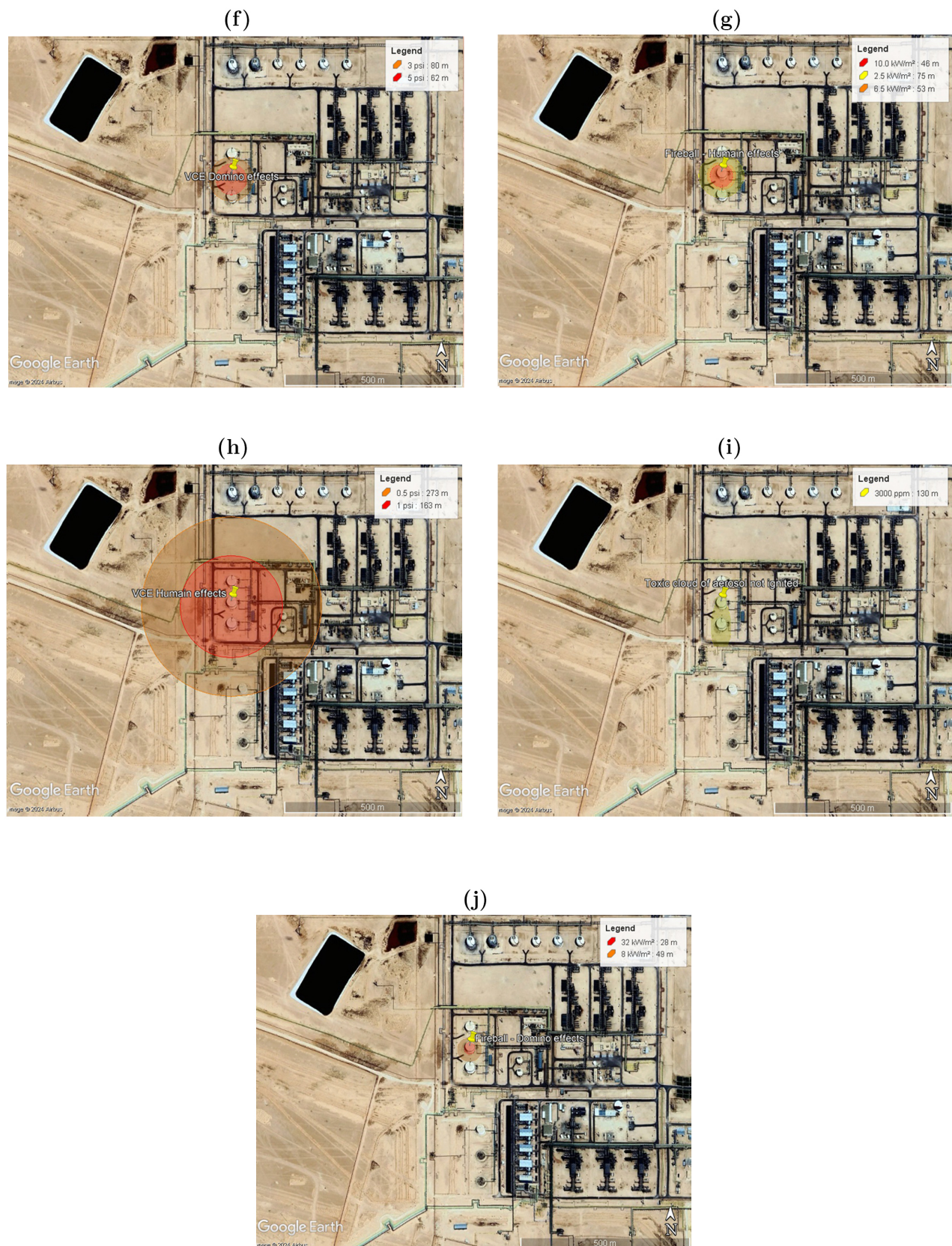


Figure 5.8 | Simulation des effets des phénomènes dangereux (2)

que les effets soient généralement réversibles, des blessures, un inconfort thermique important, voire des incapacités temporaires, peuvent être observés.

Ces résultats mettent en évidence l'importance cruciale de la mise en place de mesures de sécurité renforcées, notamment en matière de gestion des zones d'évacuation, de sensibilisation du personnel et de déploiement de dispositifs d'intervention d'urgence. La maîtrise de ces risques est essentielle pour garantir la sécurité des personnes évoluant à proximité de telles installations.

C. Analyse de la toxicité

Les scénarios les plus préoccupants pour la santé humaine à la suite d'une rupture catastrophique du réservoir de condensat incluent la formation de fumées toxiques issues d'un incendie, la dispersion de substances gazeuses ou de produits non brûlés. Dans le cas d'une dispersion de nappe de condensat non enflammée, représentée à la Figure 5.7(e), la délimitation de la zone toxique est établie sur la base des seuils de concentration acceptables pour l'homme (PAC).

À une distance de 134 mètres de la source de dispersion, une concentration de 33 000 ppm (niveau PAC-2) est atteinte, correspondant à un seuil critique au-delà duquel des effets graves, irréversibles ou incapacitants peuvent survenir chez les personnes exposées. Cette zone représente un périmètre prioritaire d'intervention.

Plus loin, la concentration de 3000 ppm (niveau PAC-1), seuil à partir duquel des effets légers mais notables peuvent se manifester (irritations, inconfort), est atteinte à une distance de 583 mètres du point de fuite.

La connaissance précise de ces distances d'impact permet de concevoir des plans d'urgence adaptés, incluant l'évacuation rapide du personnel, la délimitation des zones de danger, et le port obligatoire d'équipements de protection individuelle (EPI) pour les équipes d'intervention.

4.3 Conclusion

La présente section conclut le chapitre dédié aux expérimentations et aux résultats en récapitulant les principales analyses menées, les données obtenues et les enseignements tirés de l'application du cadre méthodologique proposé à un cas réel de réservoir de stockage de condensats.

L'estimation de la probabilité de défaillance de l'événement critique a permis de quantifier le risque à 0,057 par million d'heures de fonctionnement, soit environ 0,000499 par an. Bien que cette valeur soit relativement faible, elle met en évidence la nécessité de considérer les conséquences potentielles en matière de santé, sécurité, environnement et pertes économiques. L'analyse a également permis d'identifier les événements de base les plus influents, notamment ceux liés à l'erreur humaine, qui se sont révélés particulièrement critiques.

En complément, 16 ensembles de coupures minimaux (MCS) susceptibles de provoquer une défaillance du système ont été générés. Sur le plan environnemental, les scénarios étudiés montrent que le rejet de condensat constitue une source importante de pollution de l'air, avec un risque estimé entre 30 % et 49 %, tandis que l'impact sur les sols demeure limité (environ 0,001158 %), en raison de la volatilité du produit. Enfin, des données prédictives ont été produites pour caractériser les zones affectées, les concentrations de substances dangereuses et les niveaux d'exposition potentiels, fournissant ainsi un appui précieux à la gestion des situations

d'urgence.

Conclusion générale et perspectives

Les risques associés au stockage des hydrocarbures dans les réservoirs pétroliers représentent un défi majeur pour l'industrie pétrolière et chimique, en raison de leur impact potentiel sur la sécurité humaine, l'environnement et les infrastructures critiques. Face à la complexité croissante des systèmes industriels et à l'incertitude inhérente aux données disponibles, cette thèse a proposé un cadre méthodologique innovant, intégrant des outils avancés de modélisation dynamique, d'analyse probabiliste et de traitement de l'incertitude, dans une optique de maîtrise globale des risques.

La contribution principale de cette recherche repose sur le développement d'un cadre hybride combinant la méthode Bow-tie issue de l'approche MIMAH, les réseaux bayésiens dynamiques (DBN), le jugement des experts, la théorie des ensembles flous, et une version modifiée de la méthode Fuzzy Analytical Hierarchy Process (FAHP-EAM). Cette intégration méthodologique a permis de surmonter les limitations des approches classiques en fournissant une modélisation plus réaliste et évolutive des scénarios d'accidents.

En particulier, la transformation des modèles Bow-tie en réseaux bayésiens dynamiques a permis une mise à jour probabiliste en temps réel et une meilleure représentation des interactions entre les événements de base. Cette approche a été validée à travers une étude de cas appliquée à un réservoir de condensats en Algérie, pour laquelle l'événement critique identifié "la rupture catastrophique" a été modélisé et quantifié. La probabilité de survenance de cet événement a été estimée à 0,000499 par an (soit 0,057 pour un million d'heures de fonctionnement), soulignant l'importance de considérer ces scénarios malgré leur faible probabilité apparente, au regard des conséquences graves qu'ils impliquent : atteinte à la santé des travailleurs, pollution de l'air, dommages matériels et pertes financières.

Par ailleurs, l'évaluation floue des événements de base, à partir des jugements de 15 experts, a permis de réduire la subjectivité en pondérant les avis selon des critères définis, et en procédant à l'agrégation, défuzzification et transformation des probabilités linguistiques. Cette démarche a mis en évidence le rôle critique de certaines défaillances humaines (telles que l'oubli de matériel après intervention ou une mauvaise procédure de soudage), qui se sont révélées plus influentes que d'autres BEs dans le calcul de la probabilité d'accident.

Du point de vue environnemental, la modélisation des conséquences a permis d'anticiper les impacts d'un déversement de condensat, notamment la pollution atmosphérique (due à la volatilisation des composés) avec un niveau de risque estimé entre 30 % et 49 %, et une contamination du sol jugée faible, autour de 0,001158 % en raison de la nature volatile du condensat. Les résultats ont aussi permis d'identifier les zones potentiellement exposées, les concentrations des matières dangereuses et les niveaux d'exposition pour les personnes, les structures et l'environnement, apportant ainsi un appui concret à la planification des réponses d'urgence.

Le cadre développé dans cette thèse présente des perspectives d'application larges, allant bien au-delà des réservoirs de stockage, et pouvant être adapté à d'autres installations industrielles complexes : sites chimiques, centrales énergétiques ou infrastructures de transport. Il permet de pallier les lacunes des approches classiques, en offrant des outils d'aide à la décision performants, transparents et adaptés aux incertitudes multiples du terrain.

En perspective, l'intégration de techniques avancées de fusion de données, combinant capteurs intelligents, historique de pannes, et avis experts, pourrait encore renforcer la fiabilité et la sensibilité des estimations de probabilités. De même, une meilleure prise en compte des facteurs humains et organisationnels, à travers l'inclusion d'une dimension comportementale, ouvrirait la voie vers une analyse plus holistique du risque.

En définitive, cette thèse marque une avancée notable dans la manière d'aborder les risques liés au stockage des hydrocarbures, en conjuguant rigueur scientifique et pragmatisme opérationnel. Le cadre intégré proposé répond à la fois aux exigences d'analyse approfondie et aux contraintes de la réalité industrielle. Il enrichit la littérature scientifique tout en fournissant aux professionnels des outils concrets pour améliorer la sécurité, la résilience et la durabilité des installations à risque. Ce travail s'inscrit dans une dynamique d'amélioration continue, essentielle pour faire face aux défis actuels et futurs de la gestion des risques technologiques.

Annexes

Formulaire du jugement d'experts

Système d'application:

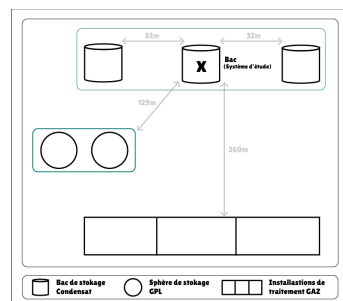
- * Equipement : Bac de stockage à toit fixe
- * Produit stocké : Condensat de gaz naturel
- * L'équipement est construit selon le standard API 650, Welded Tanks for Oil Storage.
- * Conditions climatiques :
 - 1-/ Température : la température moyenne annuelle est de 30°C le jour et 15°C la nuit. à noter que la température en été peut atteindre les 46°C.
 - 2-/ Vent : La vitesse varie de 1 à 16 m/s. Des vents forts dépassant 16 m/s peuvent souffler en hiver.
 - 3-/ Humidité : Moyenne annuelle de 30%

diemai.zahra@gmail.com [Changer de compte](#)



* Indique une question obligatoire

Schéma explicatif du système d'étude



Informations personnelles :

Age: *

Votre réponse

Diplome: ●

- ☐ Licence
☐ Master
☐ Ingénieur
☐ Magister
☐ Docteur
☐ Professeur
☐ Autre :

Nombre d'années d'expérience: *

- ☐ Inférieur ou égale à 5 ans
- ☐ 6 - 9 ans
- ☐ 10 - 19 ans
- ☐ 20 - 29 ans
- ☐ Supérieur ou égale à 30 ans

Etablissement : ★

Votre réponse

Poste occupé / Service : *

Votre réponse

Questions :

1. What is the occurrence frequency of an internal ignition source inside the equipment ? / Quelle est la probabilité d'apparition d'une source d'inflammation interne dans l'équipement?

- ☐ Very low
- ☐ Low
- ☐ Fairly Low
- ☐ Medium
- ☐ Fairly high
- ☐ High
- ☐ Very high

Comment / Commentaire

Votre réponse

2. What is the level of contribution of the "internal flammable mixture" factor, in the presence of an ignition source, to the internal explosion/combustion in the equipment ? / Quel est le niveau de contribution du facteur « mélange inflammable interne », en présence d'une source d'inflammation, à l'explosion/combustion interne dans l'équipement ?

- ☐ Very low
☐ Low
☐ Fairly Low
☐ Medium
☐ Fairly high
☐ High
☐ Very high

Comment / Commentaire

Votre réponse

3. How often does the cooling system fail on demand ? / Quel est la fréquence de *
défaillance du système de refroidissement à la demande (à la sollicitation) ?

- ☐ Very low
☐ Low
☐ Fairly Low
☐ Medium
☐ Fairly high
☐ High
☐ Very high

Comment / Commentaire

Votre réponse

4. How do you estimate the frequency of temperature rise (climate) outside the equipment that may affect the stored product ? / Comment estimez-vous la fréquence de l'augmentation de la température à l'extérieur de l'équipement (climat) qui peut affecter le produit stocké ?

- ☐ Very low
☐ Low
☐ Fairly Low
☐ Medium
☐ Fairly high
☐ High
☐ Very high

Comment / Commentaire

Votre réponse

5. How do you estimate the frequency of temperature rise (nearby heat radiation_Fire...) outside the equipment that may affect the stored product ? / Comment estimez-vous la fréquence de l'augmentation de la température à l'extérieur de l'équipement (rayonnement thermique à proximité_Incendie...) qui peut affecter le produit stocké ? *

- ☐ Very low
☐ Low
☐ Fairly Low
☐ Medium
☐ Fairly high
☐ High
☐ Very high

Comment / Commentaire

Votre réponse

6. How can the high wind speed cause the excessive external stress of an equipment contains conception or installation errors related to the no respect of wind resistance standards ? / A quel point la vitesse importante du vent peut provoquer une contrainte extérieure excessive sur l'équipement s'il possède des erreurs de conception ou d'installation liés au non respect des normes de résistance au vent ? *

- ☐ Very low
☐ Low
☐ Fairly Low
☐ Medium
☐ Fairly high
☐ High
☐ Very high

Comment / Commentaire

Votre réponse

7. How the unauthorized welding (technical errors) may impact the embrittlement of the equipment structure ? / Comment les soudures non autorisées (erreurs techniques) peuvent impacter la fragilisation de la structure de l'équipement ? *

- ☐ Very low
☐ Low
☐ Fairly Low
☐ Medium
☐ Fairly high
☐ High
☐ Very high

Comment / Commentaire

Votre réponse

8. How can the defective maintenance (not replaced like with like) brittle the equipment structure ? / Comment la maintenance défectueuse (non remplacement par des pièces similaire) peut fragiliser la structure de l'équipement ? *

- ☐ Very low
☐ Low
☐ Fairly Low
☐ Medium
☐ Fairly high
☐ High
☐ Very high

Comment / Commentaire

Votre réponse

9. How the manufacturing errors may brittle the equipment structure ? / Comment les erreurs de fabrication peuvent fragiliser la structure de l'équipement ? *

- ☐ Very low
☐ Low
☐ Fairly Low
☐ Medium
☐ Fairly high
☐ High
☐ Very high

Comment / Commentaire

Votre réponse

10. How can the wrong material delivered (spare part) cause the brittle of the equipment structure ? / A quel point le matériel non-compatible livré (pièces de rechange) provoque la fragilisation de la structure de l'équipement ? *

- ☐ Very low
☐ Low
☐ Fairly Low
☐ Medium
☐ Fairly high
☐ High
☐ Very high

Comment / Commentaire

Votre réponse

11. How the presence of chemicals and water in the stored product can brittle the equipment structure (corrosion) ? / Comment la présence des produits chimiques et de l'eau dans le produit stocké fragilise la structure de l'équipement (corrosion) ? *

- ☐ Very low
☐ Low
☐ Fairly Low
☐ Medium
☐ Fairly high
☐ High
☐ Very high

Comment / Commentaire

Votre réponse

Informations personnelles :

Age: *

Votre réponse

Diplome: *

- ☐ Licence
☐ Master
☐ Ingénieur
☐ Magister
☐ Docteur
☐ Professeur
☐ Autre :

Nombre d'années d'expérience : *

☐ Inférieur ou égale à 5 ans

☐ 6 - 9 ans

☐ 10 - 19 ans

☐ 20 - 29 ans

☐ Supérieur ou égale à 30 ans

Etablissement : *

Votre réponse

Poste occupé / Service : *

Votre réponse

Questions :

1. What is the occurrence frequency of an internal ignition source inside the equipment ? / Quelle est la probabilité d'apparition d'une source d'inflammation interne dans l'équipement ? *

☐ Very low

☐ Low

☐ Fairly Low

☐ Medium

☐ Fairly high

☐ High

☐ Very high

Comment / Commentaire

Votre réponse

2. What is the level of contribution of the "internal flammable mixture" factor, in the presence of an ignition source, to the internal explosion/combustion in the equipment ? / Quel est le niveau de contribution du facteur « mélange inflammable interne », en présence d'une source d'inflammation, à l'explosion/combustion interne dans l'équipement ? *

☐ Very low

☐ Low

☐ Fairly Low

☐ Medium

☐ Fairly high

☐ High

☐ Very high

Comment / Commentaire

Votre réponse

3. How often does the cooling system fail on demand ? / Quel est la fréquence de défaillance du système de refroidissement à la demande (à la sollicitation) ? *

☐ Very low

☐ Low

☐ Fairly Low

☐ Medium

☐ Fairly high

☐ High

☐ Very high

Comment / Commentaire

Votre réponse

4. How do you estimate the frequency of temperature rise (climate) outside the equipment that may affect the stored product ? / Comment estimez-vous la fréquence de l'augmentation de la température à l'extérieur de l'équipement (climat) qui peut affecter le produit stocké ? *

☐ Very low

☐ Low

☐ Fairly Low

☐ Medium

☐ Fairly high

☐ High

☐ Very high

Comment / Commentaire

Votre réponse

5. How do you estimate the frequency of temperature rise (nearby heat radiation_Fire...) outside the equipment that may affect the stored product ? / Comment estimez-vous la fréquence de l'augmentation de la température à l'extérieur de l'équipement (rayonnement thermique à proximité_Incendie...) qui peut affecter le produit stocké ? *

☐ Very low

☐ Low

☐ Fairly Low

☐ Medium

☐ Fairly high

☐ High

☐ Very high

Comment / Commentaire

Votre réponse

6. How can the high wind speed cause the excessive external stress of an equipment contains conception or installation errors related to the no respect of wind resistance standards ? / A quel point la vitesse importante du vent peut provoquer une contrainte extérieure excessive sur l'équipement s'il possède des erreurs de conception ou d'installation liés au non respect des normes de résistance au vent ? *

☐ Very low

☐ Low

☐ Fairly Low

☐ Medium

☐ Fairly high

☐ High

☐ Very high

Comment / Commentaire

Votre réponse

7. How the unauthorized welding (technical errors) may impact the embrittlement of the equipment structure ? / Comment les soudures non autorisées (erreurs techniques) peuvent impacter la fragilisation de la structure de l'équipement ? *

☐ Very low

☐ Low

☐ Fairly Low

☐ Medium

☐ Fairly high

☐ High

☐ Very high

Comment / Commentaire

Votre réponse

8. How can the defective maintenance (not replaced like with like) brittle the equipment structure ? / Comment la maintenance défectueuse (non remplacement par des pièces similaire) peut fragiliser la structure de l'équipement ?

☐ Very low

☐ Low

☐ Fairly Low

☐ Medium

☐ Fairly high

☐ High

☐ Very high

Comment / Commentaire

Voire réponse

9. How the manufacturing errors may brittle the equipment structure ? / Comment les erreurs de fabrication peuvent fragiliser la structure de l'équipement ?

☐ Very low

☐ Low

☐ Fairly Low

☐ Medium

☐ Fairly high

☐ High

☐ Very high

Comment / Commentaire

Voire réponse

10. How can the wrong material delivered (spare part) cause the brittle of the equipment structure ? / A quel point le matériel non-compatible livré (pièces de rechange) provoque la fragilisation de la structure de l'équipement ?

☐ Very low

☐ Low

☐ Fairly Low

☐ Medium

☐ Fairly high

☐ High

☐ Very high

Comment / Commentaire

Voire réponse

11. How the presence of chemicals and water in the stored product can brittle the equipment structure (corosion) ? / Comment la présence des produits chimiques et de l'eau dans le produit stocké fragilise la structure de l'équipement (corrosion) ?

☐ Very low

☐ Low

☐ Fairly Low

☐ Medium

☐ Fairly high

☐ High

☐ Very high

Comment / Commentaire

Voire réponse

Bibliographie

- [Abbasi and Abbasi, 2007] Abbasi, T. and Abbasi, S. (2007). The boiling liquid expanding vapour explosion (bleve): Mechanism, consequence assessment, management. *Journal of Hazardous materials*, 141(3):489–519.
- [AgenaRisk, 2025] AgenaRisk (2025). Agenarisk - software for risk analysis and decision making. Consulté le 23 mars 2025.
- [Ahmed and Fakhruddin, 2018] Ahmed, F. and Fakhruddin, A. (2018). A review on environmental contamination of petroleum hydrocarbons and its biodegradation. *International Journal of Environmental Sciences & Natural Resources*, 11(3):1–7.
- [Ahmed and Kilic, 2015] Ahmed, F. and Kilic, K. (2015). Modification to fuzzy extent analysis method and its performance analysis. In *2015 International Conference on Industrial Engineering and Systems Management (IESM)*, pages 435–438. IEEE.
- [Al Fozaié and Wahid, 2022] Al Fozaié, M. T. and Wahid, H. (2022). A guide to integrating expert opinion and fuzzy ahp when generating weights for composite indices. *Advances in Fuzzy Systems*, 2022(1):3396862.
- [Amin et al., 2019] Amin, M. T., Khan, F., and Zuo, M. J. (2019). A bibliometric analysis of process system failure and reliability literature. *Engineering Failure Analysis*, 106:104152.
- [An Han et al., 2020] An Han, H., Han, I., McCurdy, S., Whitworth, K., Delclos, G., Rammah, A., and Symanski, E. (2020). The intercontinental terminals chemical fire study: a rapid response to an industrial disaster to address resident concerns in deer park, texas. *International journal of environmental research and public health*, 17(3):986.
- [Andrews and Dunnett, 2002] Andrews, J. D. and Dunnett, S. J. (2002). Event-tree analysis using binary decision diagrams. *IEEE Transactions on Reliability*, 49(2):230–238.
- [Arbre Analyste, 2024] Arbre Analyste (2024). Arbre analyste – logiciel d’analyse des défaillances. Consulté le 3 mai 2025.
- [Aruldoss et al., 2013] Aruldoss, M., Lakshmi, T. M., and Venkatesan, V. P. (2013). A survey on multi criteria decision making methods and its applications. *American Journal of Information Systems*, 1(1):31–43.
- [Atkinson et al., 2017] Atkinson, G., Cowpe, E., Halliday, J., and Painter, D. (2017). A review of very large vapour cloud explosions: Cloud formation and explosion severity. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 48:367–375.

- [Aubry, 2005] Aubry, C. (2005). La gestion des risques dans les entreprises françaises: état des lieux et émergence d'une approche cognitive et organisationnelle. In *Comptabilité et connaissances*, pages CD–Rom.
- [Aven, 2016] Aven, T. (2016). Risk assessment and risk management: Review of recent advances on their foundation. *European journal of operational research*, 253(1):1–13.
- [Aven, 2024] Aven, T. (2024). Risk literacy: Foundational issues and its connection to risk science. *Risk Analysis*, 44(5):1011–1020.
- [Aven et al., 2018] Aven, T., Ben-Haim, Y., Andersen, H. B., Cox, T., Droguett, E. L., Greenberg, M., Guikema, S. D., Kröger, W., Renn, O., Thompson, K. M., et al. (2018). Society for risk analysis glossary.
- [Aven and Renn, 2009] Aven, T. and Renn, O. (2009). On risk defined as an event where the outcome is uncertain. *Journal of risk research*, 12(1):1–11.
- [Baker et al., 2019] Baker, Q., Thomas, J., Malik, D., and Edel, M. (2019). Caribbean petroleum vce case history. *Loss Prevention Bulletin*, (269).
- [Banerjee et al., 2021] Banerjee, J. S., Chakraborty, A., and Chattopadhyay, A. (2021). A decision model for selecting best reliable relay queue for cooperative relaying in cooperative cognitive radio networks: the extent analysis based fuzzy ahp solution. *Wireless Networks*, 27(4):2909–2930.
- [Bearfield and Marsh, 2005] Bearfield, G. and Marsh, W. (2005). Generalising event trees using bayesian networks with a case study of train derailment. In *International Conference on Computer Safety, Reliability, and Security*, pages 52–66. Springer.
- [Bernstein and Hoffenberg, 1998] Bernstein, P. L. and Hoffenberg, J. (1998). *Plus forts que les dieux: [la remarquable histoire du risque]*. Flammarion.
- [Birnbaum, 1968] Birnbaum, Z. W. (1968). On the importance of different components in a multicomponent system. (*No Title*).
- [Board, 2005] Board, B. M. I. I. (2005). Buncefield major incident investigation. *Initial Report to the Health and Safety Commission and the Environment Agency of the investigation into the explosions and fires at the Buncefield oil storage and transfer depot, Hemel Hempstead, on 11th December*, pages 4–203.
- [Bobbio et al., 2001] Bobbio, A., Portinale, L., Minichino, M., and Ciancamerla, E. (2001). Improving the analysis of dependable systems by mapping fault trees into bayesian networks. *Reliability Engineering & System Safety*, 71(3):249–260.
- [Bouchiba, 2013] Bouchiba, A. (2013). *Evaluation de dysfonctionnement d'un système par approche bayésienne: cas du système ferroviaire*. PhD thesis, Université d'Angers.
- [Buckley, 1985] Buckley, J. J. (1985). Fuzzy hierarchical analysis. *Fuzzy sets and systems*, 17(3):233–247.

- [Bureau international du Travail, 1990] Bureau international du Travail (1990). *Prévention des accidents industriels majeurs*. Recueil de directives pratiques du BIT. Bureau international du Travail, Genève. Publié également en anglais sous le titre *Prevention of Major Industrial Accidents* (ISBN 92-2-107101-4) et en espagnol sous le titre *Prevención de accidentes industriales mayores* (ISBN 92-2-307101-1).
- [Callon et al., 2001] Callon, M., Lascoumes, P., and Barthe, Y. (2001). Agir dans un monde incertain: essai sur la démocratie technique.
- [CCPS, 1989] CCPS (1989). *Guidelines for Process Equipment Reliability Data with Data Tables*. American Institute of Chemical Engineers (AIChE) / CCPS, New York, NY. CCPS Publication.
- [Chang, 1996] Chang, D.-Y. (1996). Applications of the extent analysis method on fuzzy ahp. *European journal of operational research*, 95(3):649–655.
- [Chang and Lin, 2006] Chang, J. I. and Lin, C.-C. (2006). A study of storage tank accidents. *Journal of loss prevention in the process industries*, 19(1):51–59.
- [Chen and Hwang, 1992] Chen, S.-J. and Hwang, C.-L. (1992). Fuzzy multiple attribute decision making methods. In *Fuzzy multiple attribute decision making: Methods and applications*, pages 289–486. Springer.
- [Chen et al., 2023] Chen, Y., Fang, J., Zhang, X., Miao, Y., Lin, Y., Tu, R., and Hu, L. (2023). Pool fire dynamics: Principles, models and recent advances. *Progress in Energy and Combustion Science*, 95:101070.
- [Chibane, 2016] Chibane, M. (2016). Évaluation et analyse du risque d’incendie dans les unités de traitement de gaz naturel. <https://repository.enp.edu.dz/jspui/bitstream/123456789/10250/1/CHIBANE.Mourad.pdf>. Mémoire de Master, École Nationale Polytechnique.
- [Cicoella, 2008] Cicoella, A. (2008). Les composés organiques volatils (cov): définition, classification et propriétés. *Revue des maladies respiratoires*, 25(2):155–163.
- [Ciriello et al., 2017] Ciriello, V., Lauriola, I., Bonvicini, S., Cozzani, V., Di Federico, V., and Tartakovsky, D. M. (2017). Impact of hydrogeological uncertainty on estimation of environmental risks posed by hydrocarbon transportation networks. *Water Resources Research*, 53(11):8686–8697.
- [Clark and Verwoerd, 2012] Clark, S. T. and Verwoerd, W. S. (2012). Minimal cut sets and the use of failure modes in metabolic networks. *Metabolites*, 2(3):567–595.
- [Cokely et al., 2012] Cokely, E. T., Galesic, M., Schulz, E., Ghazal, S., and Garcia-Retamero, R. (2012). Measuring risk literacy: The berlin numeracy test. *Judgment and Decision making*, 7(1):25–47.
- [Collins and Keeley, 2003] Collins, A. and Keeley, D. (2003). *Loss of containment incident analysis*. Health & Safety Laboratory.
- [Cooke, 1991] Cooke, R. (1991). *Experts in uncertainty: opinion and subjective probability in science*. Oxford university press.

- [Coudert and Madre, 1993] Coudert, O. and Madre, J. C. (1993). Fault tree analysis: 10/sup 20/prime implicants and beyond. In *Annual Reliability and Maintainability Symposium 1993 Proceedings*, pages 240–245. IEEE.
- [Council et al., 2009] Council, N. R., on Earth, D., Studies, L., on Environmental Studies, B., and on Improving Risk Analysis Approaches Used by the US EPA, C. (2009). Science and decisions: advancing risk assessment.
- [Debray et al., 2004] Debray, B., Piatyszek, E., Cauffet, F., and Londiche, H. (2004). Generic fault trees. Aramis d1c – appendix 4, Armines, École Nationale Supérieure de Mines de Saint-Étienne. July 2004.
- [Debray and Salvi, 2005] Debray, B. and Salvi, O. (2005). Aramis project: an integrated risk assessment methodology that answers the needs of various stakeholders. *WIT Transactions on The Built Environment*, 82.
- [Delvosalle et al., 2004a] Delvosalle, C., Fiévez, C., and Pipart, A. (2004a). Aramis d1c—appendix 5 methodology for the building of generic event trees (mimah). *Faculté Polytechnique de Mons, Major Risk Research Centre: Mons, Belgium*.
- [Delvosalle et al., 2004b] Delvosalle, C., Fiévez, C., and Pipart, A. (2004b). Accidental risk assessment methodology for industries in the context of the seveso ii directive. Deliverable d.1.c., wp 1, Faculté Polytechnique de Mons, Major Risk Research Centre, Mons, Belgique. Contract number: EVG1-CT-2001-00036.
- [Delvosalle et al., 2004c] Delvosalle, C., Fiévez, C., and Pipart, A. (2004c). Method to associate critical events and relevant hazardous equipment. Aramis d1c – appendix 3, Major Risk Research Centre, Faculté Polytechnique de Mons.
- [Delvosalle et al., 2004d] Delvosalle, C., Fiévez, C., and Pipart, A. (2004d). Probabilistic aspects in the event tree. Aramis d1c – appendix 12, Major Risk Research Centre, Faculté Polytechnique de Mons.
- [Det Norske Veritas, 2010] Det Norske Veritas (2010). Études « risk assessment » des unités industrielles de la division production : « analyse de risques » sonatrach dp – hassi r’mel – centre – mpp4. Technical Report EP002715 – N° 6-3, Rév. 1, Det Norske Veritas (DNV Energy). Rapport DNV Energy.
- [Dunjó et al., 2010] Dunjó, J., Fthenakis, V., Vílchez, J. A., and Arnaldos, J. (2010). Hazard and operability (hazop) analysis. a literature review. *Journal of hazardous materials*, 173(1-3):19–32.
- [Ericson and Ll, 1999] Ericson, C. A. and Ll, C. (1999). Fault tree analysis. In *System Safety Conference, Orlando, Florida*, volume 1, pages 1–9.
- [Evans et al., 1994] Evans, J. S., Gray, G. M., Sielken, R. L., Smith, A. E., Valdezflores, C., and Graham, J. D. (1994). Use of probabilistic expert judgment in uncertainty analysis of carcinogenic potency. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 20(1):15–36.
- [Ezzati et al., 2012] Ezzati, R., Allahviranloo, T., Khezerloo, S., and Khezerloo, M. (2012). An approach for ranking of fuzzy numbers. *Expert Systems with applications*, 39(1):690–695.

- [Fan, 2005] Fan, J. (2005). Collection of oil tanks accident analysis.
- [Fenton and Neil, 2014] Fenton, N. and Neil, M. (2014). Decision support software for probabilistic risk assessment using bayesian networks. *IEEE software*.
- [Ferson and Ginzburg, 1996] Ferson, S. and Ginzburg, L. R. (1996). Different methods are needed to propagate ignorance and variability. *Reliability Engineering & System Safety*, 54(2-3):133–144.
- [Grisales Palacio, 2007] Grisales Palacio, V.-H. (2007). *Modélisation et commande floues de type Takagi–Sugeno appliquées à un bioprocédé de traitement des eaux usées*. Thèse de doctorat, Laboratoire d’Analyse et d’Architecture des Systèmes (LAAS), CNRS Doctorat de l’Université Paul Sabatier – Toulouse III et Universidad de los Andes, Toulouse, France & Bogotá, Colombie. Soutenue le 22 février 2007 devant le jury présidé par Joseph Aguilar.
- [Guetarni et al., 2019] Guetarni, I. H., Aissani, N., Châtelet, E., and 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.
- [Guetarni, 2019] Guetarni, I. H. M. (2019). *Analyse quantitative des risques: Application sur les bacs De stockage*. PhD thesis, Université Mohamed Ben Ahmed d’Oran 2.
- [Guo et al., 2021] Guo, X., Ji, J., Khan, F., Ding, L., and 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.
- [Haider et al., 2021] Haider, F. U., Ejaz, M., Cheema, S. A., Khan, M. I., Zhao, B., Liqun, C., Salim, M. A., Naveed, M., Khan, N., Núñez-Delgado, A., et al. (2021). Phytotoxicity of petroleum hydrocarbons: Sources, impacts and remediation strategies. *Environmental Research*, 197:111031.
- [Hajduk, 2021] Hajduk, S. (2021). Multi-criteria analysis in the decision-making approach for the linear ordering of urban transport based on topsis technique. *Energies*, 15(1):274.
- [Halloul et al., 2019] Halloul, Y., Chiban, S., and 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.
- [Hoyland and Rausand, 2009] Hoyland, A. and Rausand, M. (2009). *System reliability theory: models and statistical methods*. John Wiley & Sons.
- [Hsu and Chen, 1996] Hsu, H.-M. and Chen, C.-T. (1996). Aggregation of fuzzy opinions under group decision making. *Fuzzy sets and systems*, 79(3):279–285.
- [IAP-UFO, 2016] IAP-UFO (2016). Risques liés aux stockages des hydrocarbures. Document interne.
- [Igalens and Joras, 2017] Igalens, J. and Joras, M.-C. (2017). *Méthodologie de la recherche : Réussir son mémoire ou sa thèse*. Gualino, Paris.

- [Imron et al., 2020] Imron, M. F., Kurniawan, S. B., Ismail, N., and Abdullah, S. R. S. (2020). Future challenges in diesel biodegradation by bacteria isolates: a review. *Journal of Cleaner Production*, 251:119716.
- [INERIS, 2012] INERIS (2012). Vers un modèle de l’acceptabilité sociale des risques industriels – rapport omega 7-2. https://www.ineris.fr/sites/ineris.fr/files/contribution/Documents/rapport_omega_7-2.pdf. Consulté en avril 2025.
- [INERIS, 2025] INERIS (2025). Primarisk - plateforme d’aide à l’analyse des risques industriels. <https://primarisk.ineris.fr/>. Consulté en avril 2025.
- [ISO/IEC, 1999] ISO/IEC (1999). Iso/iec guide 51: 1999 (e), safety aspects–guidelines for their inclusion in standards.
- [ISO/IEC, 2014] ISO/IEC (2014). Iso/iec guide 51: 2014.
- [Jeandel et al., 2013] Jeandel, C., Mosseri, R., and Fuchs, A. (2013). *L’énergie à découvert*. Editions du CNRS.
- [Jiskani et al., 2022] Jiskani, I. M., Yasli, F., Hosseini, S., Rehman, A. U., and Uddin, S. (2022). Improved z-number based fuzzy fault tree approach to analyze health and safety risks in surface mines. *Resources Policy*, 76:102591.
- [Kabir et al., 2016] Kabir, S., Walker, M., Papadopoulos, Y., Råde, E., and Securius, P. (2016). Fuzzy temporal fault tree analysis of dynamic systems. *International Journal of Approximate Reasoning*, 77:20–37.
- [Khakzad et al., 2011] Khakzad, N., Khan, F., and Amyotte, P. (2011). Safety analysis in process facilities: Comparison of fault tree and bayesian network approaches. *Reliability Engineering & System Safety*, 96(8):925–932.
- [Khan and Sadiq, 2005] Khan, F. I. and Sadiq, R. (2005). Risk-based prioritization of air pollution monitoring using fuzzy synthetic evaluation technique. *Environmental monitoring and assessment*, 105:261–283.
- [Kidam and Hurme, 2013] Kidam, K. and Hurme, M. (2013). Analysis of equipment failures as contributors to chemical process accidents. *Process Safety and Environmental Protection*, 91(1-2):61–78.
- [Kjaerulff and Madsen, 2008] Kjaerulff, U. B. and Madsen, A. L. (2008). *Bayesian Networks and Influence Diagrams: A Guide to Construction and Analysis*. Information Science and Statistics. Springer.
- [Klein and Vaughen, 2017] Klein, J. A. and Vaughen, B. K. (2017). *Process Safety: Key Concepts and Practical Approaches*. CRC Press.
- [KOVALEVSKY, 2023] KOVALEVSKY, O. (2023). Comprendre l’iso 31000–management du risque–lignes directrices.
- [Kubler et al., 2016] Kubler, S., Robert, J., Derigent, W., Voisin, A., and Le Traon, Y. (2016). A state-of the-art survey & testbed of fuzzy ahp (fahp) applications. *Expert systems with applications*, 65:398–422.

- [Kumar and Singh, 2022] Kumar, M. and 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.
- [Kvassay et al., 2016] Kvassay, M., Levashenko, V., and Zaitseva, E. (2016). Analysis of minimal cut and path sets based on direct partial boolean derivatives. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability*, 230(2):147–161.
- [Laitonen and Niemelä, 2014] Laitonen, J. and Niemelä, I. (2014). Analyzing system changes with importance measure pairs: Risk increase factor and fussell-vesely compared to birnbaum and failure probability. In *Proceedings of the 12th International Probabilistic Safety Assessment and Management Conference*, pages 22–27.
- [Langree et al., 2020] Langree, C., Franquet, E., Reveillon, J., Lecocq, G., and Demoulin, F. (2020). Cfd simulation of an unconfined vapor cloud explosion through obstacles using open-foam. In *13th International symposium on hazards, prevention, and mitigation of industrial explosions (ISHPMIE 2020)*, pages 262–269.
- [Laufer, 1985] Laufer, R. (1985). L’entreprise face aux risques majeurs: à propos de l’incertitude des normes sociales.
- [Lees, 2012] Lees, F. (2012). *Lees’ Loss prevention in the process industries: Hazard identification, assessment and control*. Butterworth-Heinemann.
- [Lenoble and Deust, 2009] Lenoble, C. and Deust, C. (2009). Programme eat – dra 71 – opération b1 : Approche probabiliste - quantification des phénomènes dangereux en probabilité – guide pratique pour les dépôts de liquides inflammables (dli). Technical report, INERIS, Verneuil-en-Halatte, France. Réf. INERIS-DRA-09-102965-04675C, 45 pages.
- [Lima-Junior and Carpinetti, 2020] Lima-Junior, F. R. and Carpinetti, L. C. R. (2020). Dealing with the problem of null weights and scores in fuzzy analytic hierarchy process. *Soft Computing*, 24(13):9557–9573.
- [Lowesmith et al., 2007] Lowesmith, B. J., Hankinson, G., Acton, M., and Chamberlain, G. (2007). An overview of the nature of hydrocarbon jet fire hazards in the oil and gas industry and a simplified approach to assessing the hazards. *Process safety and environmental protection*, 85(3):207–220.
- [MEDD-INERIS, 2004] MEDD-INERIS (2004). *Guide technique relatif aux valeurs de référence de seuils d’effets des phénomènes accidentels des installations classées*. MEDD.
- [Meyer and Booker, 2001] Meyer, M. A. and Booker, J. M. (2001). *Eliciting and analyzing expert judgment: a practical guide*. SIAM.
- [Mohammadi et al., 2020] Mohammadi, L., Rahdar, A., Bazrafshan, E., Dahmardeh, H., Susan, M. A. B. H., and Kyzas, G. Z. (2020). Petroleum hydrocarbon removal from wastewaters: a review. *Processes*, 8(4):447.
- [Mohsendokht, 2017] Mohsendokht, M. (2017). Risk assessment of uranium hexafluoride release from a uranium conversion facility by using a fuzzy approach. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 45:217–228.

- [Moshashaei et al., 2018] Moshashaei, P., Alizadeh, S. S., Jafarabadi, M. A., and Khazini, L. (2018). Prioritizing the causes of fire and explosion in the external floating roof tanks. *Journal of failure analysis and prevention*, 18:1587–1600.
- [Moshashaei et al., 2017] Moshashaei, P., Alizadeh, S. S., Khazini, L., and Asghari-Jafarabadi, M. (2017). Investigate the causes of fires and explosions at external floating roof tanks: A comprehensive literature review. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 17:1044–1052.
- [Mosleh et al., 1987] Mosleh, A., Bier, V., and Apostolakis, G. (1987). Methods for the elicitation and use of expert opinion in risk assessment: Phase 1, a critical evaluation and directions for future research. Technical report, Pickard, Lowe and Garrick, Inc., Newport Beach, CA (USA); Nuclear Regulatory
- [Motet, 2010] Motet, G. (2010). Le concept de risque et son évolution. In *Annales des Mines-Responsabilité et environnement*, volume 57, pages 32–37. ESKA.
- [MétéoAlgérie, 2024] MétéoAlgérie (2024).
- [Nannapaneni et al., 2016] Nannapaneni, S., Mahadevan, S., and Rachuri, S. (2016). Performance evaluation of a manufacturing process under uncertainty using bayesian networks. *Journal of Cleaner Production*, 113:947–959.
- [Nejad and Mashinchi, 2011] Nejad, A. M. and Mashinchi, M. (2011). Ranking fuzzy numbers based on the areas on the left and the right sides of fuzzy number. *Computers & Mathematics with Applications*, 61(2):431–442.
- [Nicholas and Whitfieldb, 2013] Nicholas, M. and Whitfieldb, A. (2013). The buncefield accident and the environmental consequences for fuel storage sites and other sites in the uk, regulated under the seveso directive. *Chemical Engineering*, 31.
- [Onisawa, 1988] Onisawa, T. (1988). An approach to human reliability in man-machine systems using error possibility. *Fuzzy sets and Systems*, 27(2):87–103.
- [OREDA, 2002] OREDA (2002). *OREDA: Offshore Reliability Data Handbook, 4th Edition*. SINTEF Industrial Management, Stavanger, Norway. Distributed by Det Norske Veritas (DNV), OREDA-2002.
- [Oudina et al., 2024] Oudina, Z., Dib, A., Yakoubi, M. A., and Derdour, M. (2024). Comprehensive risk classification and mitigation in the petroleum cyber-physical systems of the oil and gas industry. *International Journal of Safety & Security Engineering*, 14(1).
- [Papadakis and Amendola, 1997] Papadakis, G. and Amendola, A. (1997). *Guidance on the preparation of a safety report to meet the requirements of Council Directive 96/82/EC (Seveso II)*. Joint Research Centre, European Commission.
- [Patej, 2003] Patej, S. (2003). Knowledge and tools formalization in the accidental risks domain (dra-35){omega}-13 boilover; formalisation du savoir et des outils dans le domaine des risques accidentels (dra-35){omega}-13 boilover.
- [Prasad and Sugeno, 1998] Prasad, N. R. and Sugeno, M. (1998). Fuzzy modeling and control: selected works of m. sugeno.

- [Purba et al., 2014] Purba, J. H., Lu, J., Zhang, G., and Pedrycz, W. (2014). A fuzzy reliability assessment of basic events of fault trees through qualitative data processing. *Fuzzy Sets and Systems*, 243:50–69.
- [Ragothaman and Anderson, 2017] Ragothaman, A. and Anderson, W. A. (2017). Air quality impacts of petroleum refining and petrochemical industries. *Environments*, 4(3):66.
- [Rajabi and Sharifipour, 2019] Rajabi, H. and Sharifipour, M. (2019). Geotechnical properties of hydrocarbon-contaminated soils: a comprehensive review. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 78:3685–3717.
- [Ramzali et al., 2015] Ramzali, N., Lavasani, M. R. M., and Ghodousi, J. (2015). Safety barriers analysis of offshore drilling system by employing fuzzy event tree analysis. *Safety science*, 78:49–59.
- [Reghezza-Zitt, 2015] Reghezza-Zitt, M. (2015). Territorialiser ou ne pas territorialiser le risque et l’incertitude. la gestion territorialisée à l’épreuve du risque d’inondation en île-de-france. *L’Espace Politique. Revue en ligne de géographie politique et de géopolitique*, (26).
- [Ross, 2005] Ross, T. J. (2005). *Fuzzy logic with engineering applications*. John Wiley & Sons.
- [Rostamabadi et al., 2020] Rostamabadi, A., Jahangiri, M., Zarei, E., Kamalinia, M., and Al-imohammadlou, M. (2020). A novel fuzzy bayesian network approach for safety analysis of process systems; an application of hfacs and shipp methodology. *Journal of Cleaner Production*, 244:118761.
- [Ruijters and Stoelinga, 2015] Ruijters, E. and 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, 1980] Saaty, T. L. (1980). The analytic hierarchy process “, isbn: 0-07-054371-2.
- [Sam’an et al., 2021] Sam’an, M. et al. (2021). An improved ranking method for fuzzy numbers using integral value of inverse function. In *Journal of Physics: Conference Series*, volume 1918, page 042147. IOP Publishing.
- [Sanseverino-Godfrin, 2010] Sanseverino-Godfrin, V. (2010). Quelle place de la ville dans les dispositions juridiques visant à prévenir les risques industriels? In *Le risque industriel: Une question de sciences humaines et sociales. Colloque international UMR 5600-ENTPE*, pages 14–pages.
- [Sarvestani et al., 2021] Sarvestani, K., Ahmadi, O., Mortazavi, S. B., and Mahabadi, H. A. (2021). Development of a predictive accident model for dynamic risk assessment of propane storage tanks. *Process Safety and Environmental Protection*, 148:1217–1232.
- [Schmidt, 2017] Schmidt, M. S. (2017). Atmospheric tank failures: Mechanisms and an unexpected case study. *Process safety progress*, 36(4):353–361.
- [Shafiq et al., 2021] Shafiq, I., Hussain, M., Shafique, S., Hamayun, M. H., Mudassir, M., Nawaz, Z., Ahmed, A., and Park, Y.-K. (2021). A comprehensive numerical design of fire-fighting systems for onshore petroleum installations. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 38:1768–1780.

- [Shan et al., 2017] Shan, X., Liu, K., and Sun, P.-L. (2017). Risk analysis on leakage failure of natural gas pipelines by fuzzy bayesian network with a bow-tie model. *Scientific programming*, 2017(1):3639524.
- [Shi et al., 2014] Shi, L., Shuai, J., and Xu, K. (2014). Fuzzy fault tree assessment based on improved ahp for fire and explosion accidents for steel oil storage tanks. *Journal of hazardous materials*, 278:529–538.
- [Singh et al., 2022] Singh, K., Kaushik, M., and Kumar, M. (2022). Integrating α -cut interval based fuzzy fault tree analysis with bayesian network for criticality analysis of submarine pipeline leakage: A novel approach. *Process Safety and Environmental Protection*, 166:189–201.
- [Sklet, 2006] Sklet, S. (2006). Safety barriers: Definition, classification, and performance. *Journal of loss prevention in the process industries*, 19(5):494–506.
- [Smith et al., 2017] Smith, D., Veitch, B., Khan, F., and Taylor, R. (2017). Understanding industrial safety: Comparing fault tree, bayesian network, and fram approaches. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 45:88–101.
- [Souguir, 2018] Souguir, S. (2018). *Simulation numérique de l'initiation de la rupture à l'échelle atomique*. PhD thesis, Université Paris-Est.
- [Taherdoost and Madanchian, 2023] Taherdoost, H. and Madanchian, M. (2023). Multi-criteria decision making (mcdm) methods and concepts. *Encyclopedia*, 3(1):77–87.
- [Tameur and Djeghar, 2019] Tameur, N. I. and Djeghar, A. (2019). Risques majeurs naturels en algérie.
- [Taveau, 2011] Taveau, J. (2011). Explosion of fixed roof atmospheric storage tanks, part 1: Background and review of case histories. *Process Safety Progress*, 30(4):381–392.
- [Tavella et al., 2025] Tavella, R. A., da Silva Júnior, F. M. R., Santos, M. A., Miraglia, S. G. E. K., and Pereira Filho, R. D. (2025). A review of air pollution from petroleum refining and petrochemical industrial complexes: Sources, key pollutants, health impacts, and challenges. *ChemEngineering*, 9(1):13.
- [Thyer et al., 2009] Thyer, A., Jagger, S., Atherton, W., and Ash, J. (2009). A review of catastrophic failures of bulk liquid storage tanks. *Loss Prevention Bulletin*, (205).
- [Tixier et al., 2002] Tixier, J., Dusserre, G., Salvi, O., and Gaston, D. (2002). Review of 62 risk analysis methodologies of industrial plants. *Journal of Loss Prevention in the process industries*, 15(4):291–303.
- [Trávníček et al., 2021] Trávníček, P., Junga, P., Kudělka, J., and Kotek, L. (2021). Prevention of an atmospheric storage tank bund failure. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 70:104438.
- [TURMEL, 2024] TURMEL, J.-Y. (2024). Référentiel iso 45001—pour un management de la santé et de la sécurité au travail performant.

- [U.S. Environmental Protection Agency, 2025] U.S. Environmental Protection Agency (2025). ALOHA (areal locations of hazardous atmospheres) software. <https://www.epa.gov/cameo/aloha-software>. [Online; accessed May 1, 2025].
- [Van Laarhoven and Pedrycz, 1983] Van Laarhoven, P. J. and Pedrycz, W. (1983). A fuzzy extension of saaty's priority theory. *Fuzzy sets and Systems*, 11(1-3):229–241.
- [Wang et al., 2013] Wang, D., Zhang, P., and Chen, L. (2013). Fuzzy fault tree analysis for fire and explosion of crude oil tanks. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 26(6):1390–1398.
- [Wang, 2009] Wang, Y.-M. (2009). Centroid defuzzification and the maximizing set and minimizing set ranking based on alpha level sets. *Computers & Industrial Engineering*, 57(1):228–236.
- [Yang et al., 2025] Yang, D., Xing, K., Pan, L., Lu, N., and Yu, J. (2025). Sustainable risk management framework for petroleum storage facilities: Integrating bow-tie analysis and dynamic bayesian networks. *Sustainability*, 17(6):2642.
- [Yang et al., 2019] Yang, R., Gai, K., Yang, F., Zhang, G., Sun, N., Feng, B., and Zhu, X. (2019). Simulation analysis of propylene storage tank leakage based on aloha software. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, volume 267, page 042038. IOP Publishing.
- [Yanting and Liyun, 2011] Yanting, Z. and Liyun, X. (2011). Research on risk management of petroleum operations. *Energy Procedia*, 5:2330–2334.
- [Yazdi, 2017] Yazdi, M. (2017). Hybrid probabilistic risk assessment using fuzzy fta and fuzzy alhp in a process industry. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 17:756–764.
- [Yazdi, 2019] Yazdi, M. (2019). Acquiring and sharing tacit knowledge in failure diagnosis analysis using intuitionistic and pythagorean assessments. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 19:369–386.
- [Yazdi et al., 2017] Yazdi, M., Daneshvar, S., and Setareh, H. (2017). An extension to fuzzy developed failure mode and effects analysis (fdfmea) application for aircraft landing system. *Safety science*, 98:113–123.
- [Yazdi and Kabir, 2017] Yazdi, M. and Kabir, S. (2017). A fuzzy bayesian network approach for risk analysis in process industries. *Process safety and environmental protection*, 111:507–519.
- [Yazdi et al., 2019] Yazdi, M., Kabir, S., and 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 and Zarei, 2018] Yazdi, M. and Zarei, E. (2018). Uncertainty handling in the safety risk analysis: an integrated approach based on fuzzy fault tree analysis. *Journal of failure analysis and prevention*, 18:392–404.
- [Zadeh, 1965] Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy sets. *Information and control*, 8(3):338–353.

- [Zerrouki and Tamrabet, 2015] Zerrouki, H. and Tamrabet, A. (2015). Safety and risk analysis of an operational heater using bayesian network. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 15(5):657–661.
- [Zheng and Chen, 2011] Zheng, B. and Chen, G.-h. (2011). Storage tank fire accidents. *Process Safety Progress*, 30(3):291–293.
- [Zhü, 2014] Zhü, K. (2014). Fuzzy analytic hierarchy process: Fallacy of the popular methods. *European Journal of Operational Research*, 236(1):209–217.