



Université du 20 Août 1955 SKIKDA

**Institut des sciences et techniques Appliquées
(ISTA-Skikda)**

**Mémoire de fin de cycle en vue de l'obtention du diplôme de
Master**

Filière : Hygiène et Sécurité Industrielle

Spécialité : Sécurité des Procédés Pétrolières et Gazières

TITRE DE MEMOIRE :

**Application intégrée des méthodes nœud de papillon
et AHP pour l'analyse des risques majeurs d'un
réacteur chimique au complexe pétrochimique de
Skikda (CP2K)**

Présenté et soutenu publiquement le : 30/06/2025

Par :

- **Wail Madani BOULAAGOUR**
- **Salah SAHRAOUI**

Devant le jury :

Président :	Pr. Fares INNAL	U- 20 Août 1955. Skikda
Rapporteur :	Dr. Widad BOUSFOT	U- 20 Août 1955. Skikda
Rapporteur de stage :	Ing Abdelslam BOUDEBZA	Unité de CP2K
Examineur :	Dr. Mohyiddine HAMAIDIA	U- 20 Août 1955. Skikda
Examineur :	Dr. Amel CHELGHAM	U- 20 Août 1955. Skikda

2^{ème} Promotion Juin 2025



Université du 20 Août 1955 SKIKDA

**Institut des sciences et techniques Appliquées
(ISTA-Skikda)**

**Mémoire de fin de cycle en vue de l'obtention du diplôme de
Master**

Filière : Hygiène et Sécurité Industrielle

Spécialité : Sécurité des Procédés Pétrolières et Gazières

TITRE DE MEMOIRE :

**Application intégrée des méthodes nœud de papillon
et AHP pour l'analyse des risques majeurs d'un
réacteur chimique au complexe pétrochimique de
Skikda (CP2K)**

Présenté et soutenu publiquement le : 30/06/2025

Par :

- **Wail Madani BOULAAGOUR**
- **Salah SAHRAOUI**

Devant le jury :

Président :	Pr. Fares INNAL	U- 20 Août 1955. Skikda
Rapporteur :	Dr. Widad BOUSFOT	U- 20 Août 1955. Skikda
Rapporteur de stage :	Ing Abdelslam BOUDEBZA	Unité de CP2K
Examineur :	Dr. Mohyiddine HAMAIDIA	U- 20 Août 1955. Skikda
Examineur :	Dr. Amel CHELGHAM	U- 20 Août 1955. Skikda

2^{ème} Promotion Juin 2025

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à ceux qui, quels que soient les termes embrassés, je n'arriverais jamais à leur exprimer mon amour sincère.

A la femme qui a souffert sans me laisser souffrir, qui n'a jamais dit non à mes exigences et qui n'a épargné aucun effort pour me rendre
heureuse ; mon adorable mère.

A l'homme, mon précieux offre du dieu, qui doit ma vie, ma réussite
et tout mon respect ; mon père.

A mon cher frère Taha Yassine Abd el Karim, tous mes amis, surtout
groupe 8 ... Que dieu leur donne une longue et joyeuse vie

Wail Madani

C'est avec profonde gratitude et sincères mots, que je dédie ce
modeste travail de fin d'étude à mes chers parents ; qui ont sacrifié
leurs vies pour ma réussite et m'ont éclairé le chemin par leurs
conseils judicieux.

À mon cher père.

À mon paradis, ma mère.

À ma tendre sœur Oumaima.

À mes fous frères Mohammed, Ayoub et Adem

À mes chers amis et surtout Charara.

À toute la famille de Sahraoui.

Sahraoui Salah

Remerciements

Je tiens à exprimer ma sincère gratitude à Dr. Bousfot Widad, qui m'a honorée par son encadrement tout au long de ce travail. Je la remercie chaleureusement pour sa disponibilité, ses conseils pertinents et son accompagnement rigoureux, qui ont grandement contribué à l'élaboration de ce mémoire.

Je remercie également M. Boudebza Abdeslam et M. Hamdouch Sofiane de l'unité CP2K Skikda, pour leur accompagnement exceptionnel et leur soutien actif durant mon stage. Leur disponibilité, leurs explications claires et leur engagement ont été d'une aide précieuse dans la réalisation de ce travail.

Mes remerciements vont aussi à l'ensemble du corps enseignant et administratif du Département de sécurité industrielle, à la Faculté des sciences et de la technologie de l'Université 20 Août 1955 Skikda, pour la qualité de la formation reçue durant mon parcours universitaire.

Je n'oublie pas d'adresser mes remerciements à mes collègues et camarades pour leur soutien, leur entraide et les bons moments partagés.

Enfin, j'exprime toute ma reconnaissance à ma famille, pour leur appui moral, leur patience et leur présence constante tout au long de ces années d'étude.

Je remercie également toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réussite de ce travail.

La liste des tableaux

Tableau 1.1: Distinction entre risques majeurs et risques courants.....	6
Tableau 1.2: Exemple de tableau de type « APR ».....	14
Tableau 2.1: Légende des événements figurant sur le modèle du nœud papillon.....	26
Tableau 2.2: L'échelle fondamentale pour la comparaison par paires dans l'AHP.....	36
Tableau 3.1: Les différents grades du PEHD produits au niveau de CP2K et ses utilisations.....	50
Tableau 4.1: Les barrières de prévention (entre causes et événement redouté)	59
Tableau 4.2: Les barrières de protection (entre événement redouté et conséquences).....	61

La liste des figures

Figure 1.1: Arbre de défaillance.....	17
Figure 1.2: exemple d'arbre des évènements.....	19
Figure 1.3: Exemple de la méthode Nœud Papillon.....	19
Figure 1.4: Classification des méthodes d'analyse des risques.....	20
Figure 1.5: Une matrice de risque.....	22
Figure 2.1: Représentation de scénarios d'accident selon le modèle du nœud papillon.....	26
Figure 2.2: Arbre du nœud papillon.....	28
Figure 2.3: Modèle de nœud papillon.....	29
Figure 2.4: Événement redouté.....	30
Figure 2.5: Représente les menaces.....	30
Figure 2.6: Représente les conséquences.....	31
Figure 2.7: les barrières.....	32
Figure 2.8: Facteur de Dégradation.....	32
Figure 2.9: Structure du modèle AHP.....	35
Figure 2.10: Structure de la hiérarchie AHP.....	36
Figure 3.1: complexe de CP2K.....	42
Figure 3.2: Schéma d'occupation du sol du complexe CP2K.....	44
Figure 3.3: photo représente les zones qui existe dans le complexe.....	45
Figure 3.4: Photo représente les principales installations de l'unité CP2K.....	45
Figure 3.5: Produit final (polyéthylène).....	47
Figure 4.1: réacteur chimique.....	55
Figure 4.2: structure hiérarchique.....	63
Figure 4.3: Interface d'accueil du logiciel SuperDecisions.....	64
Figure 4.4: Modélisation de la structure hiérarchique dans SuperDecisions.....	64
Figure 4.5: Liaison entre l'objectif et les critères dans l'arborescence.....	65
Figure 4.6: Liaison entre les critères et les barrières de prévention.....	65
Figure 4.7: Matrice de jugements pair-à-pair entre l'objectif et les critères.....	66
Figure 4.8: Matrice des jugements – Critère : Facilité de mise en œuvre.....	66
Figure 4.9: Matrice des jugements – Critère : Efficacité technique.....	67
Figure 4.10: Matrice des jugements – Critère : Fiabilité.....	67
Figure 4.11: Matrice des jugements – Critère : Coût.....	68
Figure 4.12: Résultats globaux de l'analyse AHP – Classement des barrières.....	68

Les abréviations

Abréviation	Signification
HSE	Hygiène, Sécurité, Environnement.
ISO	International Organization for Standardization.
PPAM	Politique de Prévention des Accidents Majeurs.
SGS	Système de Gestion de la Sécurité.
APR	Analyse Préliminaire des Risques.
AMDEC	Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité.
HAZOP	Hazard and Operability Study.
AdD	Arbre de Défaillance.
AdE	Arbre d'Événement.
SWOT	Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats.
AHP	Analytic Hierarchy Process.
INERIS	Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques.
INRS	Institut National de Recherche et de Sécurité.
CCPS	Center for Chemical Process Safety.
MCDM	Multi-Criteria Decision Making.
ICPE	Installations Classées pour la Protection de l'Environnement.
SONATRACH	Société Nationale pour la Recherche, la Production, le Transport, la Transformation, et la Commercialisation des Hydrocarbures.
CP2K	Complexe Pétrochimique 2 Skikda.
PEHD	Polyéthylène Haute Densité.
POLYMED	Polyéthylène Méditerranéen.
ENIP	Entreprise Nationale des Industries Pétrochimiques.
N2	Azote.
DCS	Système de Contrôle Distribué (Distributed Control System).
PSV	Soupape de Sécurité de Pression (Pressure Safety Valve).
UPS	Alimentation Électrique Sans Interruption (Uninterruptible Power Supply).

SOMMAIRE

Contents

Dédicace.....	I
Remerciements.....	II
La liste des tableaux.....	III
La liste des figures.....	IV
Les abréviation.....	V
Résumé	13
Chapitre 01 : Fondamentaux théoriques de la gestion des risques dans l'industrie	3
Introduction	4
1. Concepts clés liés au risque industriel	4
1.1. Aléa ou menace	4
1.2. Vulnérabilité	4
1.3. Risque	5
1.4. Dommage.....	5
1.5. Evénements initiateurs.....	5
1.6. Définition les barrières de sécurité	5
1.7. Distinction entre risques majeurs et risques courants	5
1.7.1. Le risque majeur.....	5
1.7.2. Un risque courant.....	5
2. Cadre réglementaire et normatif	6
2.1. Principales réglementations internationales et nationales.....	6
2.1.1. Directive Seveso	6
2.1.2. ISO 31000 - Management du risque	7
2.1.3. Normes HSE (Hygiène, Sécurité, Environnement).....	7
2.2. Les exigences en matière de prévention des accidents majeurs	7
2.3. Le rôle des autorités de contrôle et de la culture de sécurité dans les entreprises industrielles.....	8
2.3.1 Les autorités de contrôle	8
2.3.2. La culture de sécurité.....	8
3. La gestion des risques dans l'industrie.....	9
3.1. Définition de la gestion des risques	9
3.2. Les objectifs de la gestion des risques.....	9
3.3. Processus de gestion des risques.....	9
3.3.1. Identification des risques	10
3.3.2. Analyse des risques.....	10
3.3.3. Hiérarchisation des risques	10
3.3.4. Planification de la réponse aux risques	10
3.3.5. Suivi et examen des risques	10
3.4. Les outils et techniques de la gestion des risques.....	11
3.4.1. La cartographie des risques.....	11

SOMMAIRE

3.4.2. La matrice des risques.....	11
3.4.3. L'analyse SWOT	11
3.4.4. Les plans de continuité d'activité (PCA)	11
3.4.5. Déployer la culture du risque dans l'organisation	12
3.4.6. Sensibiliser et former les collaborateurs	12
3.4.7. Définir une gouvernance claire de la gestion des risques.....	12
4. Les méthodes d'analyses des risques	12
4.1. Les principales méthodes d'analyse des risques	12
4.1.1. Analyse préliminaire des risques (APR).....	13
4.1.2. L'analyse des modes de défaillance de leur effet et de leur criticité (AMDEC).....	14
4.1.3. La méthode HAZOP	15
4.1.4. La méthode arbre de défaillance (AdD).....	16
4.1.5. La méthode arbre d'événement (AdE).....	17
4.1.6. La méthode nœud papillon	19
4.2. Classification des méthodes : qualitatives, quantitatives, semi-quantitatives.....	220
4.2.1. L'analyse Qualitative.....	21
4.2.2. L'analyse Quantitative	21
4.2.3. L'analyse Semi- Quantitative	21
5. Outils Complémentaires d'Aide à la Décision dans la Gestion des Risques	21
5.1. Matrice de Risque (Risk Matrix)	21
5.1.1. Définition.....	21
5.1.2. Principe de fonctionnement	22
5.2. AHP (Analytic Hierarchy Process) : Une Méthode de Hiérarchisation et de Priorisation	22
5.2.1. Définition.....	22
Conclusion.....	23
Chapitre 02 : La Méthode Nœud Papillon et la Méthode AHP pour la Gestion des Risques	24
1. La Méthode Nœud de Papillon (Bow-Tie).....	25
1.1. Historique et domaine d'application	25
1.2. Définition de la méthode	25
1.3. Objectif de la méthode	25
1.4. Schéma descriptif du nœud papillon :	26
1.4.1. Analyse par arbre.....	27
1.5. Structure et les éléments du modèle nœud de Papillon.....	29
1.5.1. Danger	29
1.5.2. Événement redouté.....	29
1.5.3. Menace.....	30
1.5.4. Conséquence.....	30
1.5.5. Barrière Préventive	31
1.5.6. Barrière Mitigative.....	31

SOMMAIRE

1.5.7. Facteur de Dégradation	32
1.6. Les étapes de mise en œuvre de la méthode Nœud de Papillon	32
1.7. Bénéfices de la démarche Bowtie	33
1.8. Limites de la méthode Bowtie.....	33
2. La méthode AHP	34
2.1. Définition de la méthode	34
2.2. Principe de la méthode.....	34
2.3. Objectif de la méthode AHP	34
2.4. Structure du modèle AHP	35
2.5. Les étapes de la méthode AHP	35
2.6. Les avantages de la méthode AHP	37
2.7. Les limites de la méthode AHP.....	38
3. Approche Intégrée Nœud de Papillon – AHP pour l’Optimisation de la Gestion des Risques.	38
3.1. Pourquoi combiner ces deux méthodes ?	38
3.2. Quelle est la méthode pour les combiner ?.....	38
3.3. Quels sont les avantages ?.....	38
Conclusion.....	39
Présentation du complexe CP2K (POLYMED).....	40
Introduction	41
1. Présentation de complexe CP2K	41
2. Historique de l’unité.....	43
3. Implantation du CP2K.....	43
4. Découpage du complexe.....	44
5. Les principales installations du complexe	45
5.1. Installations auxiliaires	46
6. Mission du complexe	46
7. Le PEHD	46
7.1. Définition de produit	46
8. Description du procédé	47
9. Grades du PEHD produit au niveau de CP2K	49
Conclusion.....	50
Chapitre 04 : Application de La Méthode Nœud Papillon et la Méthode AHP sur réacteur chimique	52
Introduction	53
1. Objectifs de l’étude pratique	53
2. Description du cas pratique.....	54
2.1. Caractéristiques principales	54
2.2. Contexte de risque	54
3. Fonctionnement du réacteur 950-155	55
3.1. Alimentation et Circulation.....	55

SOMMAIRE

3.2. Processus de Polymérisation.....	56
3.3. Mesures et Contrôle	56
3.4. Évacuation du Produit	56
3.5. Optimisation du Processus et Sécurité	56
3.6. Gestion de la Chaleur et des Résidus.....	57
4. Application de la méthode Bow-Tie.....	57
4.1. Événement redouté (Top Event) : Perte de confinement du réacteur 950-155.....	57
4.2. Causes principales (partie gauche du nœud)	57
4.3. Conséquences possibles (partie droite du nœud).....	57
4.4. Construction de l'arbre.....	57
5. Application de la méthode AHP.....	62
5.1. Application de la méthode AHP aux barrières de prévention.....	62
5.2. Définition de l'objectif.....	62
5.3. Choix des critères	62
5.4. Sélection des alternatives	62
5.5. Construction de la hiérarchie	63
5.6. Mise en œuvre de la méthode AHP à l'aide du logiciel SuperDecisions	63
5.7. Hiérarchisation des barrières.....	69
6. Interprétation et plan d'action	69
6.1. Interprétation des résultats	69
6.2. Plan d'action recommandé	69
6.2.1. Mesures prioritaires à mettre en œuvre	69
6.2.2. Mesures complémentaires à envisager	69
Conclusion.....	70
Bibliography	73
Annexe	75
1. Présentation du logiciel SuperDecisions.....	76
2. Objectif du logiciel.....	76
3. Fonctionnement général.....	76
3.1. Modélisation hiérarchique du problème :	76
3.2. Comparaisons par paires	76
3.3. Calcul des poids et des priorités	76
3.4. Synthèse et visualisation des résultats	76
4. Avantages du logiciel.....	77
5. Application dans ce travail	77
5.1. Illustration : Interface du logiciel SuperDecisions	77

المخلص

تُعد إدارة المخاطر الصناعية عمليةً منهجية تهدف إلى تحديد وتحليل وتقييم الأخطار التي قد تهدد سلامة العمليات والأشخاص في البيئات الصناعية، وتؤدي هذه الإدارة دورًا محوريًا في الوقاية من الحوادث وضمان استمرارية النشاط من خلال الاعتماد على استراتيجيات فعّالة للوقاية والاستجابة. تهدف هذه الدراسة إلى تقييم وتسيير المخاطر الصناعية الكبرى من خلال الجمع بين طريقتين مكملتين: مخطط ربطة العنق وطريقة التحليل الهرمي (التحليل الترتيبي للعمليات). وقد تم تطبيق هذه المنهجية على سيناريو فقدان احتواء المفاعل 155-950 في وحدة CP2K بسكيكدة، والمتخصصة في إنتاج البولي إيثيلين عالي الكثافة باستخدام تقنية "فيليبس". تم إعداد مخطط ربطة عنق لتحديد الأسباب والعواقب والحوادث الوقائية والتخفيفية، وبعد ذلك استُخدمت طريقة التحليل الهرمي لترتيب هذه الحواجز بناءً على عدة معايير: الفعالية، الموثوقية، التكلفة، وسهولة التنفيذ. أظهرت نتائج التحليل أن الحواجز التقنية، وخاصة المرتبطة بأنظمة التحكم والمراقبة، جاءت في مقدمة الأولويات، ومع ذلك، تظل الحواجز البشرية والتنظيمية ضرورية لتعزيز فعالية نظام السلامة بشكل شامل.

الكلمات المفتاحية

إدارة المخاطر ، الحوادث الصناعية ، مخطط ربطة العنق ، طريقة التحليل الهرمي ، فقدان الاحتواء ، تقييم المخاطر ، البولي إيثيلين عالي الكثافة ، تقييم المخاطر.

Résumé

La gestion des risques industriels constitue un processus structuré visant à identifier, analyser et évaluer les dangers susceptibles de compromettre la sécurité des opérations et des personnes dans les environnements industriels. Elle joue un rôle essentiel dans la prévention des accidents et la garantie de la continuité des activités, en s'appuyant sur des stratégies efficaces de prévention et de réponse. La présente étude a pour objectif d'évaluer et de gérer les risques industriels majeurs en combinant deux approches complémentaires : la méthode du nœud papillon et l'analyse hiérarchique des processus (AHP – Analytic Hierarchy Process). L'application pratique concerne un scénario de perte de confinement du réacteur 950-155, situé dans l'unité CP2K de Skikda, spécialisée dans la production de polyéthylène haute densité (PEHD) selon le procédé Phillips. Un diagramme en nœud papillon a été élaboré afin d'identifier les causes, les conséquences, ainsi que les barrières de prévention et d'atténuation. Par la suite, la méthode AHP a permis de hiérarchiser ces barrières selon plusieurs critères : efficacité, fiabilité, coût et facilité de mise en œuvre. Les résultats de l'analyse révèlent que les barrières techniques, en particulier celles liées aux systèmes de contrôle et de surveillance, occupent les premières positions en termes de priorité. Toutefois, les barrières humaines et organisationnelles demeurent essentielles pour renforcer l'efficacité globale du dispositif de sécurité.

Les mots clés

Gestion des risques industriels, nœud papillon, AHP, perte de confinement, PEHD, évaluation des risques.

Abstract

Industrial risk management is a structured process aimed at identifying, analyzing, and assessing hazards that may compromise the safety of operations and personnel in industrial environments. It plays a key role in accident prevention and in ensuring the continuity of operations through effective prevention and response strategies. This study aims to assess and manage major industrial risks by combining two complementary approaches: the Bow-Tie diagram and the Analytic Hierarchy Process (AHP). The practical application focuses on a loss of containment scenario involving reactor 950-155 in the CP2K unit of Skikda, which specializes in the production of high-density polyethylene (HDPE) using the Phillips process. A Bow-Tie diagram was developed to identify causes, consequences, as well as preventive and mitigative barriers. Subsequently, the AHP method was applied to prioritize these barriers according to several criteria: effectiveness, reliability, cost, and ease of implementation. The analysis results reveal that technical barriers, especially those related to monitoring and control systems, rank highest in terms of priority. Nevertheless, human and organizational barriers remain essential to enhancing the overall effectiveness of the safety system.

Keywords

Industrial risk management, industrial accidents, Bow-Tie diagram, Analytic Hierarchy Process, loss of containment, HDPE, risk assessment.

Introduction générale

La gestion des risques industriels constitue un élément essentiel pour garantir la sécurité et la continuité des opérations dans les secteurs industriels. Ceux-ci sont souvent caractérisés par la complexité des procédés, l'interaction entre les facteurs humains, techniques et environnementaux, ainsi que l'évolution rapide des technologies. Ces éléments accroissent la vulnérabilité des installations aux événements majeurs, rendant indispensable une gestion rigoureuse et proactive des risques.

Dans ce contexte, le présent travail s'intéresse à l'analyse et à la gestion des risques industriels à travers la combinaison de deux méthodes complémentaires : le Nœud Papillon (Bow-Tie) et l'Analytic Hierarchy Process (AHP). Ce thème s'inscrit dans une perspective d'amélioration des outils d'aide à la décision en matière de sécurité industrielle.

Le choix de ce sujet résulte de la nécessité croissante de mettre en place des approches intégrées permettant à la fois de modéliser les scénarios d'accidents et de guider le choix des mesures de prévention de manière structurée et hiérarchisée. Il s'agit donc d'un domaine à fort enjeu pour les entreprises industrielles, en particulier celles manipulant des substances dangereuses.

La problématique à laquelle nous cherchons à répondre est la suivante : Comment intégrer efficacement les méthodes Bow-Tie et AHP pour analyser et gérer les risques dans un environnement industriel complexe, tout en garantissant le choix des barrières les plus appropriées afin d'améliorer la sécurité et optimiser l'utilisation des ressources ?

Pour répondre à cette problématique, nous posons l'hypothèse que la combinaison des deux approches permet d'améliorer la rigueur de l'analyse des risques et de renforcer la pertinence des décisions concernant les barrières de prévention, en tenant compte de critères multiples tels que l'efficacité, la fiabilité, le coût et la faisabilité.

La méthodologie adoptée dans ce travail repose sur une étude de cas appliquée à une unité industrielle réelle. Le scénario critique analysé est celui de la perte de confinement du réacteur 950-155 dans l'unité CP2K de Skikda. Les deux méthodes (Bow-Tie et AHP) sont utilisées de manière complémentaire pour identifier les causes et conséquences de l'événement redouté, puis pour hiérarchiser les barrières de prévention.

L'outil SuperDecisions a été utilisé dans le cadre de l'application de la méthode AHP, afin de réaliser les comparaisons par paires entre les différentes barrières et d'obtenir une hiérarchisation selon des critères définis.

Ce mémoire est structuré en quatre chapitres :

Le premier chapitre présente les fondements théoriques de la gestion des risques industriels ainsi qu'un aperçu des méthodes classiques d'analyse des risques.

Introduction générale

Le deuxième chapitre est consacré à la présentation détaillée des méthodes du Nœud Papillon et de l'AHP.

Le troisième chapitre décrit l'unité industrielle CP2K, en mettant l'accent sur les caractéristiques du réacteur étudié et le scénario de perte de confinement.

Le quatrième chapitre porte sur l'application pratique des deux méthodes, l'évaluation des barrières de prévention, et l'interprétation des résultats obtenus.

**Chapitre 01 : Fondamentaux théoriques de la gestion des risques
dans l'industrie**

Introduction

La sécurité industrielle est une approche pluridisciplinaire visant à assurer la conformité aux réglementations, à promouvoir des pratiques de travail sécuritaires et à préserver la santé des travailleurs. Elle repose sur la prévention des accidents par l'identification, la maîtrise des dangers, la formation, les audits, les inspections et l'application des règles en vigueur. Son importance réside dans la protection des travailleurs face aux risques liés aux équipements, aux produits chimiques et aux conditions de travail. La mise en place de mesures préventives permet de réduire les accidents, de préserver la santé des employés et de protéger l'environnement. (Lévy, et al., 2011)

La gestion des risques industriels repose sur des fondements théoriques essentiels permettant d'anticiper, de prévenir et de maîtriser les dangers liés aux activités industrielles, Elle s'articule autour de principes fondamentaux tels que l'identification, l'évaluation et la maîtrise des risques, en intégrant une approche systématique et structurée Cette démarche s'inscrit dans un cadre réglementaire strict, notamment à travers la directive Seveso et les normes européennes, qui imposent des exigences en matière de sécurité des installations et de prévention des accidents majeurs, En parallèle, diverses méthodes d'évaluation des risques, permettent de hiérarchiser les menaces et de mettre en place des mesures préventives adaptées.

Ce chapitre présente les bases essentielles pour comprendre la gestion des risques industriels, en mettant en lumière les approches, les méthodes d'analyse, ainsi que les limites des méthodes traditionnelles face à la complexité croissante des systèmes.

1. Concepts clés liés au risque industriel :

1.1. Aléa ou menace : Phénomène ou évènement, naturel ou humain, potentiellement dommageable en termes de perte en vies humaine et matériel, de santé, susceptibles d'interrompre les activités économiques et socio- culturelles et de détruire l'environnement et les biens. (Deprez, 2022)

1.2. Vulnérabilité

Capacité de résilience des communautés, des populations et de l'environnement à la menace. Niveau d'exposition de la communauté ou de l'environnement aux aléas. (Deprez, 2022)

1.3. Risque

Probabilité pour les communautés et les populations d'être exposé aux aléas, de subir des dommages humains, économiques et sociaux culturels, des destructions et de leurs biens et de leur environnement. **(Deprez, 2022)**

1.4. Dommage

Blessure physique ou atteinte à la santé des personnes, aux biens ou à l'environnement. **(L. Charlier, et al., 2004)**

1.5. Événements initiateurs

Un événement initiateur est un événement, courant ou anormal, interne ou externe au système, situé en amont de l'événement redouté central dans l'enchaînement causal et qui constitue une cause directe dans les cas simples ou une combinaison d'événements à l'origine de cette cause directe. Dans la représentation en « nœud papillon » (ou arbre des causes), cet événement est situé à l'extrémité gauche. **(INERIS, 2014)**

1.6. Définition les barrières de sécurité

Une procédure ou un élément matériel destiné à interrompre ou à modifier le scénario d'un accident de manière à réduire soit la fréquence soit les conséquences. **(CRAIM, s.d.)**

1.7. Distinction entre risques majeurs et risques courants

1.7.1. Le risque majeur

Est la possibilité d'un événement d'origine naturelle ou anthropique, dont les effets peuvent mettre en jeu un grand nombre de personnes, occasionner des dommages importants et dépasser les capacités de réaction de la société. **(M. L. Pelling, et al., 2013)**

1.7.2. Un risque courant

Désigne un événement susceptible de se produire fréquemment, avec des conséquences généralement limitées et maîtrisable. **(M. L. Pelling, et al., 2013)**

Tableau 1.1: Distinction entre risques majeurs et risques courants. (M. L. Pelling, et al., 2013)

Critère	Risque majeur	Risque courant
Probabilité	Faible	Élevée
Gravité	Très élevée (catastrophique)	Faible à modérée
Portée	Large (communautés entières, régions)	Locale (individus ou petits groupes)
Préparation	Plans d'urgence, politiques publiques	Mesures de prévention individuelles
Exemples	Séismes, inondations majeures, accidents industriels	Accidents domestiques, des blessures.

2. Cadre réglementaire et normatif

2.1. Principales réglementations internationales et nationales

2.1.1. Directive Seveso

La Directive Seveso est une série de directives européennes visant à prévenir les accidents majeurs impliquant des substances dangereuses. Elle impose aux États membres de l'Union européenne d'identifier les sites industriels présentant des risques d'accidents majeurs et d'y maintenir un haut niveau de prévention. Les principales obligations comprennent :

- La réalisation d'études de dangers par les industriels pour identifier tous les scénarios possibles d'accident, évaluer leurs conséquences et mettre en place des moyens de prévention.
- La mise en place de politiques de prévention des accidents majeurs (PPAM) et de plans d'urgence internes et externes.
- La coopération entre exploitants pour limiter les effets domino.
- La maîtrise de l'urbanisation autour des sites.
- L'information des riverains.
- La mise en place d'autorités compétentes pour l'inspection des sites à risques. (Union européenne, 2012)

2.1.2. ISO 31000 - Management du risque

La norme ISO 31000 fournit des lignes directrices pour la gestion des risques, applicables à tout type d'organisation. Elle vise à harmoniser les approches, standards et méthodologies existantes en matière de management des risques. La norme est structurée en trois parties :

- Les principes : ils répondent à la question de pourquoi faire du management des risques.
- Le cadre d'organisation : il explique comment intégrer le management des risques dans la stratégie de l'organisation.
- Le processus de management : il précise comment intégrer le management des risques au niveau opérationnel. (ISO, 2018)

2.1.3. Normes HSE (Hygiène, Sécurité, Environnement)

Les normes HSE, telles que l'ISO 45001 pour la santé et la sécurité au travail et l'ISO 14001 pour la gestion environnementale, fournissent des cadres pour la mise en place de systèmes de management intégrés visant à améliorer la performance en matière de santé, de sécurité et d'environnement. (ISO, 2018)

Selon l'article, nous constatons que

2.2. Les exigences en matière de prévention des accidents majeurs

Conformément à l'article 7 de la directive Seveso III (2012/18/UE), l'exploitant est tenu de définir une politique de prévention des accidents majeurs adaptée aux risques.

Conformément à l'article 8 de la directive Seveso III (2012/18/UE), l'exploitant est tenu de mettre en œuvre un système de gestion de la sécurité (SGS) afin de garantir l'application effective de la politique de prévention des accidents majeurs (PPAM).

Conformément à l'article 8 de la directive Seveso III (2012/18/UE), l'exploitant doit mettre en place un système de gestion de la sécurité (SGS) pour assurer la mise en œuvre efficace de la politique de prévention des accidents majeurs (PPAM).

Chapitre 01 : Fondamentaux théoriques de la gestion des risques dans l'industrie

Conformément à l'article 10 de la directive Seveso III (2012/18/UE), l'exploitant doit réaliser une analyse des risques afin d'identifier les scénarios d'accidents majeurs et d'en évaluer les conséquences potentielles.

Conformément à l'article 5 de la directive Seveso III (2012/18/UE), l'exploitant est tenu de mettre en place des mesures techniques et organisationnelles appropriées afin de réduire la probabilité et les conséquences des accidents majeurs.

Conformément à l'article 10 de la directive Seveso III (2012/18/UE), les exploitants d'établissements Seveso seuil haut sont tenus de soumettre un rapport de sécurité détaillé à l'autorité compétente.

Conformément à l'article 12 de la directive Seveso III (2012/18/UE), l'exploitant doit élaborer un plan d'urgence interne (PUI) et coopérer avec les autorités pour l'élaboration du plan d'urgence externe (PUE).

Conformément à l'article 14 de la directive Seveso III (2012/18/UE), le public doit être informé des risques d'accidents majeurs et des comportements à adopter en cas d'urgence. **(Union européenne, 2012)**

2.3. Le rôle des autorités de contrôle et de la culture de sécurité dans les entreprises industrielles

2.3.1 Les autorités de contrôle

- Le respect des lois et règlements en matière de sécurité industrielle.
- Des inspections et audits pour détecter les défaillances à risque.
- Des sanctions en cas de non-conformité (avertissements, injonctions, fermetures).
- Un accompagnement des entreprises dans l'amélioration de leur gestion de la sécurité.

2.3.2. La culture de sécurité

- La prise de conscience collective des risques.
- La communication ouverte et la remontée des incidents ou quasi-accidents.
- L'engagement actif de la direction et des employés dans la prévention.

- La réduction significative des accidents du travail et des incidents industriels. (INRS, 2020)

3. La gestion des risques dans l'industrie

3.1. Définition de la gestion des risques

La gestion des risques désigne l'ensemble des processus visant à identifier, évaluer et maîtriser les menaces ou incertitudes susceptibles d'affecter les objectifs d'une organisation. Elle repose sur une approche méthodique permettant de limiter l'exposition aux risques, d'en réduire la probabilité d'occurrence ou d'en atténuer les conséquences. Cette démarche contribue ainsi à assurer une meilleure stabilité des opérations et une exécution plus efficace des projets.

3.2. Les objectifs de la gestion des risques

- Préservation des actifs et des ressources : Assurer la protection des ressources essentielles, telles que les finances, le capital humain et les infrastructures, face aux éventuelles perturbations.
- Maintien de la continuité des activités : Réduire les interruptions opérationnelles en anticipant et en gérant les risques de manière proactive.
- Appui à la prise de décision : Fournir des analyses basées sur des données fiables afin de permettre des décisions stratégiques et sécurisées.
- Renforcement de la confiance des parties prenantes : Instaurer un climat de confiance auprès des clients, des partenaires et des parties prenantes grâce à une gestion rigoureuse et efficace des risques. (Visure Solutions, 2024)

3.3. Processus de gestion des risques

Le processus de gestion des risques est une approche systématique visant à identifier, analyser et atténuer les risques susceptibles d'impacter les objectifs, projets ou opérations d'une organisation. Cette approche fournit un cadre structuré pour faire face aux incertitudes, permettant ainsi aux entreprises de relever efficacement les défis et de garantir un succès durable.

Chapitre 01 : Fondamentaux théoriques de la gestion des risques dans l'industrie

Ce processus est constitué d'étapes interconnectées, allant de l'identification des menaces potentielles à la surveillance continue et l'affinement des stratégies. Il permet de minimiser les impacts négatifs tout en maximisant les opportunités. Un processus de gestion des risques bien défini offre la possibilité aux organisations d'aligner leurs objectifs sur des stratégies réalistes, de favoriser une meilleure prise de décision et de créer une base solide pour la croissance. Cela constitue l'épine dorsale des pratiques modernes de gestion des risques, permettant aux entreprises de faire face aux incertitudes avec confiance et agilité.

Les cinq étapes essentielles du processus de gestion des risques sont les suivantes :

3.3.1. Identification des risques

La première étape consiste à repérer les menaces potentielles qui pourraient affecter l'organisation. Cela inclut des méthodes telles que des séances de brainstorming, l'utilisation de listes de contrôle et une analyse SWOT pour identifier les faiblesses et menaces externes.

3.3.2. Analyse des risques

Une fois les risques identifiés, il est crucial de les analyser pour évaluer leur impact et leur probabilité. Les techniques incluent l'analyse qualitative (attribution de niveaux de risque) et quantitative (utilisation de données numériques pour estimer les probabilités et l'impact).

3.3.3. Hiérarchisation des risques

Cette étape consiste à classer les risques selon leur gravité et leur probabilité. Des outils comme les matrices de risques aident à visualiser cette hiérarchisation, facilitant ainsi les décisions stratégiques.

3.3.4. Planification de la réponse aux risques

Une fois les priorités définies, un plan de réponse est mis en place pour chaque risque. Ce plan peut inclure des stratégies telles que l'atténuation, l'évitement, le transfert ou l'acceptation du risque, ainsi que la préparation à des plans d'urgence si le risque se matérialise.

3.3.5. Suivi et examen des risques

Chapitre 01 : Fondamentaux théoriques de la gestion des risques dans l'industrie

La gestion des risques est un processus dynamique qui nécessite un suivi continu pour observer l'évolution des risques au fil du temps. Des outils comme les tableaux de bord et des analyses en temps réel permettent de rester informé et d'ajuster les stratégies au besoin. (Visure Solutions, 2024)

3.4. Les outils et techniques de la gestion des risques

La gestion des risques repose sur une variété d'outils qui peuvent être appliqués à différents niveaux, que ce soit au sein de l'organisation, d'un processus ou d'un projet.

3.4.1. La cartographie des risques

Si l'organisation devait ne se doter que d'un seul outil, ce serait la cartographie des risques. Cet outil permet de lister, évaluer et hiérarchiser les risques internes et externes, tout en tenant compte des parties prenantes, des activités et des localisations géographiques. En mettant en lumière les risques majeurs, la cartographie des risques permet de prioriser les actions dans le cadre du plan de gestion des risques.

3.4.2. La matrice des risques

La matrice des risques est une représentation visuelle de la cartographie des risques. À travers un code couleur, allant du vert au rouge, en passant par le jaune et l'orange, elle permet de visualiser rapidement les menaces majeures et mineures pesant sur l'organisation.

3.4.3. L'analyse SWOT

L'analyse SWOT (Forces, Faiblesses, Opportunités, Menaces) est un outil stratégique utilisé dans la gestion des risques. Elle consiste à évaluer les risques internes (forces et faiblesses) et externes (opportunités et menaces) auxquels l'organisation fait face. Très prisée des chefs de projet, l'analyse SWOT se distingue par sa simplicité, sa représentation synthétique et sa facilité de compréhension.

3.4.4. Les plans de continuité d'activité (PCA)

Les plans de continuité d'activité sont des documents essentiels dans la gestion des risques, en particulier pour les risques opérationnels majeurs. Ils ont pour objectif de définir les procédures et les ressources nécessaires pour maintenir les activités critiques de l'organisation en cas de crise.

3.4.5. Déployer la culture du risque dans l'organisation

Les risques sont omniprésents dans toute organisation et impliquent tous les collaborateurs. Une gestion des risques efficace ne peut être réalisée sans l'engagement de tous les membres de l'organisation.

3.4.6. Sensibiliser et former les collaborateurs

La gestion des risques est une démarche transversale et stratégique qui nécessite un soutien fort de la direction et des responsables. Toutefois, cet engagement ne doit pas se limiter à la hiérarchie. Il doit être intégré dans la culture organisationnelle afin de faciliter la mise en œuvre des mesures de prévention et de mitigation des risques. L'implication des collaborateurs se fait par la sensibilisation et la formation continue. Des équipes informées et engagées sont en mesure de détecter plus rapidement les signes d'un risque et d'adopter une réponse appropriée.

3.4.7. Définir une gouvernance claire de la gestion des risques

La désignation d'un responsable de la gestion des risques et l'intégration des risques dans les processus décisionnels sont des éléments cruciaux pour garantir une gestion cohérente et systématique. Selon sa taille et son organisation, l'entreprise ou l'entité publique peut aussi mettre en place un comité de gestion des risques ou désigner des responsables au sein des services pour assurer le suivi et la mise en œuvre effective du plan d'actions. (Values Associates, 2025)

4. Les méthodes d'analyses des risques

4.1. Les principales méthodes d'analyse des risques

- L'analyse préliminaire des risques (APR).
- L'analyse des modes de défaillance de leur effet et de leur criticité (AMDEC).
- L'analyse des risques sur schémas type HAZOP.
- L'analyse par arbres des défaillances (AdD).
- L'analyse par arbres d'évènements (AdE).
- L'analyse par Nœud Papillon.

4.1.1. Analyse préliminaire des risques (APR)

4.1.1.1. Historique et définition

L'Analyse Préliminaires des Risques (Dangers) a été développée au début des années 1960 dans les domaines aéronautiques et militaires. Elle est utilisée depuis dans de nombreuses autres industries. L'Union des Industries Chimiques (UIC) recommande son utilisation en France depuis le début des années 1980.

L'Analyse Préliminaire des Risques (APR) est une méthode d'usage très général couramment utilisée pour l'identification des risques au stade préliminaire de la conception d'une installation ou d'un projet. En conséquence, cette méthode ne nécessite généralement pas une connaissance approfondie et détaillée de l'installation étudiée. **(Debray, B, et al., 2011)**

4.1.1.2. Les principes

L'Analyse Préliminaire des Risques nécessite dans un premier temps d'identifier les éléments dangereux de l'installation.

Ces éléments dangereux désignent le plus souvent :

- Des substances ou préparations dangereuses, que ce soit sous forme de matières premières, de produits finis, d'utilités...
- Des équipements dangereux comme, par exemple, des stockages, zones de réception-expédition, réacteurs, fournitures d'utilités (chaudière...),
- Des opérations dangereuses associées au procédé.

Chapitre 01 : Fondamentaux théoriques de la gestion des risques dans l'industrie

-L'identification de ces éléments dangereux est fonction du type d'installation étudiée. L'APR peut être mise en œuvre sans ou avec l'aide de liste de risques types ou en appliquant les mots guides Hazop.

-Il est également à noter que l'identification de ces éléments se fonde sur la description fonctionnelle réalisée avant la mise en œuvre de la méthode.

-A partir de ces éléments dangereux, l'APR vise à identifier, pour un élément dangereux, une ou plusieurs situations de danger. Dans le cadre de ce document, une situation de danger est définie comme une situation qui, si elle n'est pas maîtrisée, peut conduire à l'exposition d'enjeux à un ou plusieurs phénomènes dangereux.

-Le groupe de travail doit alors déterminer les causes et les conséquences de chacune des situations de danger identifiées puis identifier les sécurités existantes sur le système étudié. Si ces dernières sont jugées insuffisantes vis-à-vis du niveau de risque identifié dans la grille de criticité, des propositions d'amélioration doivent alors être envisagées. **(Debray, B, et al., 2011)**

4.1.1.3. Deroulement

L'utilisation d'un tableau de synthèse constitue un support pratique pour mener la réflexion et résumer les résultats de l'analyse. Pour autant, l'analyse des risques ne se limite pas à remplir coûte que coûte un tableau. Par ailleurs, ce tableau doit parfois être adapté en fonction des objectifs fixés par le groupe de travail préalablement à l'analyse. Le tableau ci-dessous est donc donné à titre d'exemple.

Tableau 1.2 : Exemple de tableau de type « APR ». **(Debray, B, et al., 2011)**

Fonction ou système :						Date :	
1	2	3	4	5	6	7	8
N°	Produit ou équipement	Situation de danger	Causes	Conséquences	Sécurités existantes	Propositions d'amélioration	Observations

4.1.2. L'analyse des modes de défaillance de leur effet et de leur criticité (AMDEC)

4.1.2.1 Historique et domaine d'application

Chapitre 01 : Fondamentaux théoriques de la gestion des risques dans l'industrie

L'Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets (AMDE) a été employée pour la première fois dans le domaine de l'industrie aéronautique durant les années 1960.

Son utilisation s'est depuis largement répandue à d'autres secteurs d'activités tels que l'industrie chimique, pétrolière ou le nucléaire.

De fait, elle est essentiellement adaptée à l'étude des défaillances de matériaux et d'équipements et peut s'appliquer aussi bien à des systèmes de technologies différentes (systèmes électriques, mécaniques, hydrauliques...) qu'à des systèmes alliant plusieurs techniques. **(Boukhrissi, 2015)**

4.1.2.2. Principe de L'AMDEC

Recenser les risques potentiels d'erreur (ou les modes de défaillance) et en évaluer les effets puis en analyser les causes.

L'AMDEC est d'identifier et de hiérarchiser les modes potentiels de défaillance susceptibles de se produire sur un équipement, d'en rechercher les effets sur les fonctions principales des équipements et d'en identifier les causes. Pour la détermination de la criticité des modes de défaillance, l'AMDEC requiert pour chaque mode de défaillance la recherche de la gravité de ses effets, la fréquence de son apparition et la probabilité de sa détectabilité. Quand toutes ces informations sont disponibles, différentes méthodes existent pour déduire une valeur de la criticité du mode de défaillance. Si la criticité est jugée non acceptable, il est alors impératif de définir des actions correctives pour pouvoir corriger la gravité nouvelle du mode de défaillance (si cela est effectivement possible), de modifier sa fréquence d'apparition et d'améliorer éventuellement sa détectabilité. **(Boukhrissi, 2015)**

4.1.3. La méthode HAZOP

4.1.3.1. Définition de l'HAZOP

HAZOP est une méthode prépondérante dans l'analyse de la sécurité des industries de process (chimique, pharmaceutique, pétrolière...). Elle est presque indispensable pour l'examen de systèmes dont la sécurité de l'installation dépend en grande partie de la maîtrise des conditions opératoires (débit, pression, température...). La méthode HAZOP permet d'améliorer le processus lui-même, indépendamment des risques. **(Royer, 2009)**

4.1.3.2. Objectif

- Recherche systématique des causes possibles de dérive de tous les paramètres de fonctionnement d'une installation.
- Mise en évidence des principaux problèmes d'exploitation et d'entretien.
- Etude des conséquences et risques éventuels liés à ces dérives.
- Proposition des mesures correctives appropriées. **(Royer, 2009)**

4.1.3.3. Principe de L`HAZOP

La méthode HAZOP est dédiée à l'analyse des risques des systèmes thermo hydrauliques pour lesquels il est primordial de maîtriser des paramètres comme la pression, la température, le débit, écoulement, ... etc. **(INERIS, 2006)**

Le principe de l'HAZOP est d'associer des mots-clés et des paramétrés relatifs à l'installation étudiée pour ainsi déceler des dérives. Elle ne considère plus des modes de défaillances mais les dérives potentielles (ou déviations) des principaux paramétrés liés à l'exploitation de l'installation. De ce fait, elle est centrée sur le fonctionnement du procédé, à la différence de l'AMDE qui est centrée sur le fonctionnement des composants de l'installation. **(INERIS, 2003)**

4.1.4. La méthode arbre de défaillance (AdD)

4.1.4.1. Principe de l'AdD

Un arbre de défaillance représente de façon synthétique l'ensemble des combinaisons d'événements qui, dans certaines conditions produisent un événement donné, point de départ de l'étude. Construire un arbre de défaillance revient à répondre à la question « comment tel événement peut-il arriver ? », ou encore « quels sont tous les enchaînements possibles qui peuvent aboutir à cet événement ? ». **(Jean-Pierre, D, et al., 2017)**

4.1.4.2. Caractéristique de l'AdD

Un arbre de défaillance est généralement présenté de haut en bas. La ligne la plus haute ne comporte que l'événement dont on cherche à décrire comment il peut se produire. Chaque ligne détaille la ligne supérieure en présentant la combinaison ou les combinaisons susceptibles de

produire l'événement de la ligne supérieure auquel elles sont rattachées. Ces relations sont représentées par des liens logiques OU ou ET.

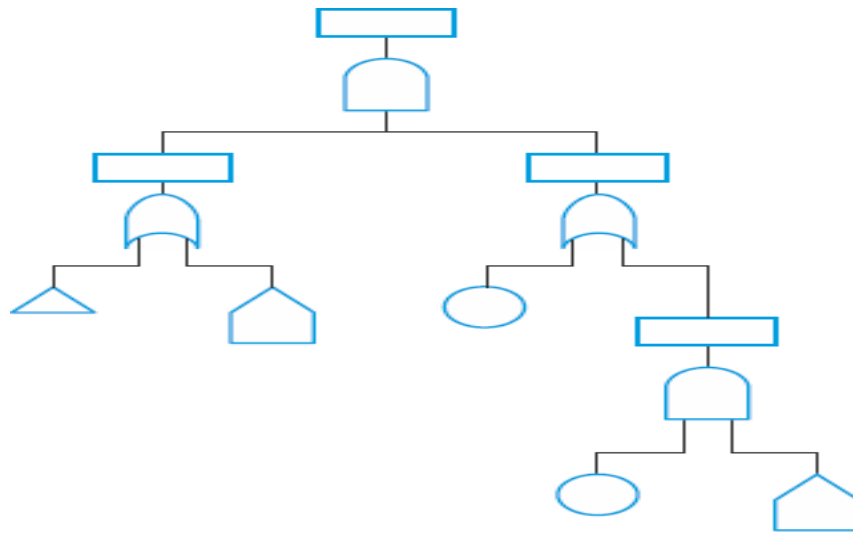


Figure 1.1: Arbre de défaillance. (Jean-Pierre, D, et al., 2017)

4.1.4.3. L'objectif de l'AdD

L'objectif « qualitatif » est de construire une synthèse de tout ce qui peut conduire à un événement redouté et d'évaluer l'effet d'une modification du système, de comparer les conséquences des mesures qui peuvent être envisagées pour réduire l'occurrence de l'événement redouté étudié. (Jean-Pierre, D, et al., 2017)

4.1.5. La méthode arbre d'événement (AdE)

4.1.5.1. L'objectif de l'arbre d'événements

Les arbres d'événements sont utilisés pour identifier les divers accidents qui peuvent se produire dans un système complexe. À la suite de l'identification des séquences d'accidents individuels, les combinaisons spécifiques de défaillance qui peuvent conduire à des accidents peuvent être déterminées à l'aide de l'arbre d'événements. L'arbre d'événements permet :

- De rechercher toutes les causes et les combinaisons de causes conduisant à l'événement de tête ;
- De déterminer si chacune des caractéristiques de fiabilité du système est

conforme à l'objectif prescrit ;

- De vérifier les hypothèses faites au cours d'autres analyses à propos de l'indépendance des systèmes et de la non-prise en compte de certaines défaillances ;
- D'identifier le(les) facteur(s) qui a(ont) les conséquences les plus néfastes sur une caractéristique de fiabilité ainsi que les modifications nécessaires pour améliorer cette caractéristique ;
- D'identifier les événements communs ou les défaillances de cause commune. (CCPS, 2008)

4.1.5.2. Principe de l'arbre d'évènements

L'ADE évalue le potentiel d'accident résultant d'une défaillance d'un équipement ou d'un dérangement de procédé (événement initiateur). À la différence de l'analyse par arbre de panne (une approche déductive) l'AAE est un raisonnement inductif où l'analyste commence par un événement initiateur et développe la séquence probable d'évènements qui conduisent aux accidents potentiels, en tenant compte tant du succès que de la défaillance des barrières de sécurité au fur et à mesure que l'accident progresse. Les arbres d'évènements fournissent une façon systématique d'enregistrer les séquences d'accidents et de définir la relation entre les événements initiateurs et la séquence d'évènements qui peut résulter en accidents.

Les arbres d'évènements sont bien indiqués pour analyser les événements initiateurs qui pourraient conduire à une variété de conséquences. Un arbre d'évènements met en évidence la cause initiale d'accidents potentiels et fonctionne à partir de l'évènement initiateur jusqu'aux effets finaux. Chaque branche d'un arbre d'évènements représente une séquence séparée d'accident qui est, pour un événement initiateur donné, un ensemble de relations entre les barrières de sécurité. (CCPS, 2008)

4.1.5.3. Application de l'arbre d'évènements

L'arbre d'évènements est utilisé pour identifier les divers événements qui peuvent survenir dans un système complexe. À la suite de l'identification des séquences individuelles d'accident, les combinaisons spécifiques de défaillance qui conduisent à des accidents peuvent alors être déterminées en utilisant l'arbre de panne.

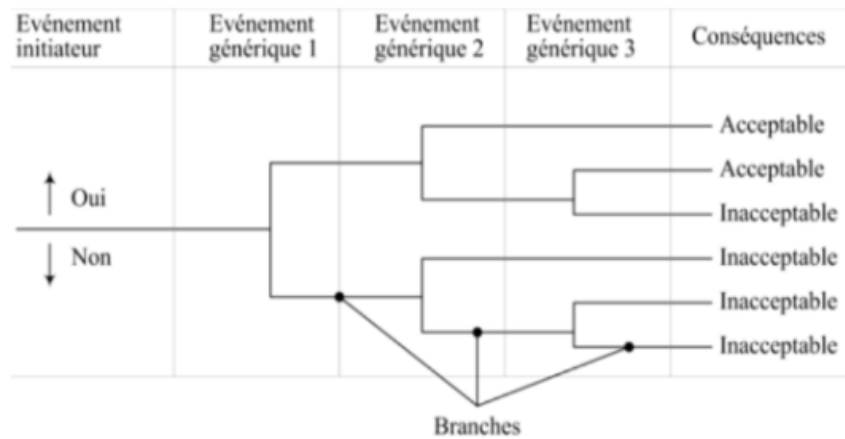


Figure 1.2: exemple d'arbre des évènements. (CCPS, 2008)

4.1.6. La méthode nœud papillon

4.1.6.1. Descriptif de la méthode

Le nœud papillon utilisé dans de nombreux secteurs industriels a été développé par la compagnie Shell. L'approche est de type dite arborescente ce qui permet de visualiser en un coup d'oeil les causes possibles d'un accident, ses conséquences et les barrières mises en place. L'accident non désiré (au centre) peut être le résultat de plusieurs causes possibles telles que la perte de confinement d'une substance toxique, une explosion, une rupture de canalisation, un emballement de réaction, une brèche dans un réservoir, une décomposition d'une substance, etc. Cet outil permet d'illustrer le résultat d'une analyse de risque détaillée (de type AMDEC, HAZOP ou What-if par exemple) donc plus complexe qu'une analyse préliminaire de risques.

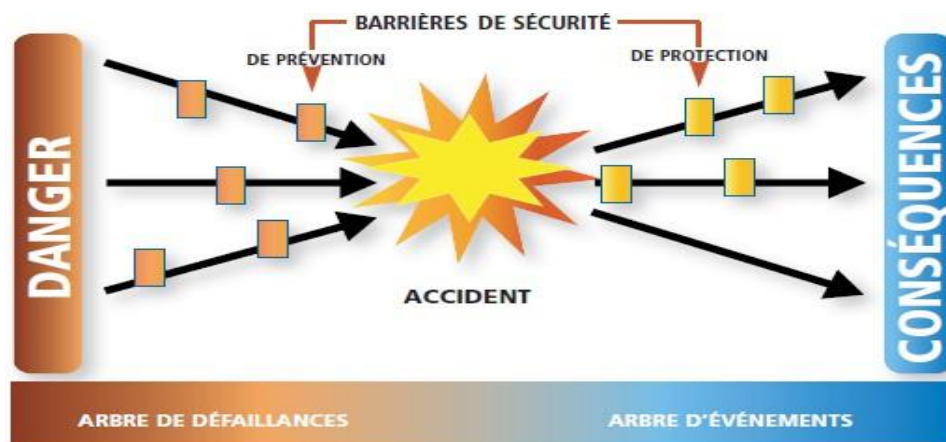


Figure 1.3: Exemple de la méthode Nœud Papillon. (CRAIM, s.d.)

- La partie gauche du nœud représente l'identification des dangers, des causes possibles d'accident et des divers enchaînements ou combinaisons (flèches noires) pouvant engendrer l'accident non désiré. Entre ces causes possibles et l'accident, des barrières dites de prévention (rectangles orange) doivent être installées.

- La partie droite du nœud représente les conséquences possibles de l'accident. Par exemple, lors de la rupture d'une canalisation ou d'une brèche dans un réservoir, il peut en résulter la formation d'une flaque ou d'un nuage. Entre cet accident et les récepteurs, des barrières de protection doivent être installées pour réduire les effets sur ces récepteurs (ex. : un système de gicleurs). (CRAIM, s.d.).

Ceci est en général, et nous allons détailler et approfondir davantage cette méthode dans le deuxième chapitre.

4.2. Classification des méthodes : qualitatives, quantitatives, semi-quantitatives

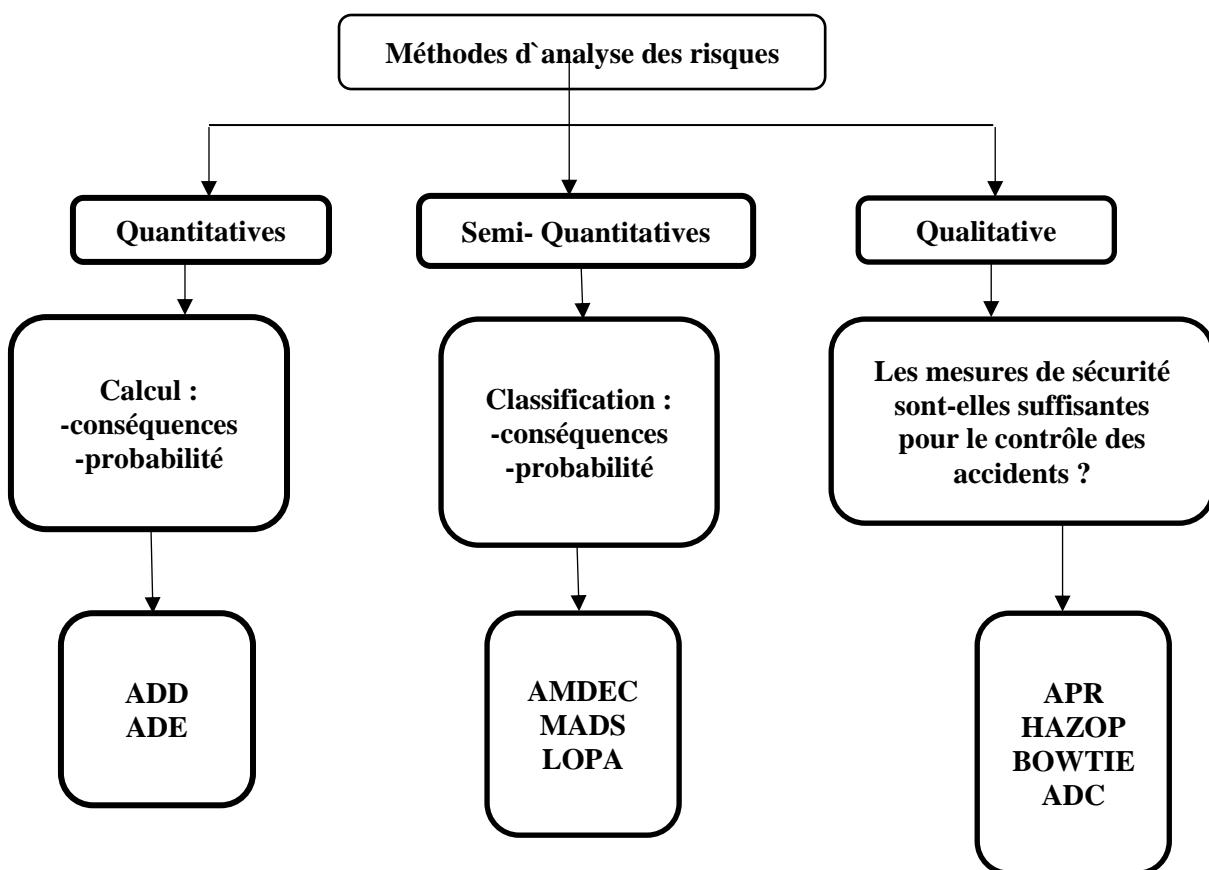


Figure 1.4: Classification des méthodes d'analyse des risques. (Achouri, 2009)

4.2.1. L'analyse Qualitative

L'analyse qualitative des risques constitue un préalable à toutes autres analyses. En effet elle permet la bonne compréhension et connaissance systématique du système étudié et de ses composants. Pour une bonne évaluation qualitative du risque cette approche ne s'appuie pas sur des données chiffrées, mais elle se réfère à des observations pertinentes sur l'état du système et surtout sur le retour d'expérience et les jugements d'experts. Cette approche nécessite alors une très bonne connaissance des différents paramètres et causes liés au système étudié. Dans quelques études de dangers, cette approche peut être suffisante pour atteindre les objectifs voulus si elle est bien menée et justifiée. **(Bourareche, 2009)**

4.2.2. L'analyse Quantitative

L'évaluation quantitative est basée sur le calcul de la probabilité et l'impact du risque d'une manière objective. Ce mode de calcul est utilisé quand l'information est suffisamment disponible pour pouvoir calculer, numériquement, la valeur de la probabilité et la gravité du risque. **(Akintoye, A, et al., 2003)**

4.2.3. L'analyse Semi- Quantitative

Lors d'une évaluation semi-quantitative, la probabilité est calculée subjectivement, mais l'impact est calculé objectivement. Ce mode de calcul s'applique lorsque l'impact du risque peut être déterminé avec exactitude alors que sa probabilité reste incertaine. Ce genre de risque concerne en général les changements dans la loi, car l'impact peut être calculé numériquement, mais la probabilité est souvent difficile à établir. **(Akintoye, A, et al., 2003)**

5. Outils Complémentaires d'Aide à la Décision dans la Gestion des Risques

5.1. Matrice de Risque (Risk Matrix)

5.1.1. Définition

Une matrice de risques est un outil graphique permettant de classifier les risques en fonction de deux dimensions principales : la probabilité d'occurrence (ou fréquence) d'un événement et la gravité (ou sévérité) de ses conséquences. Ces deux dimensions sont croisées dans une grille à double entrée pour générer une évaluation visuelle du niveau de risque. **(Cox, 2008)**

5.1.2. Principe de fonctionnement

La matrice divise les niveaux de probabilité et de gravité en catégories discrètes (par exemple : faible, moyen, élevé), puis affecte une couleur ou un score à chaque combinaison possible. Chaque cellule de la matrice indique un niveau de priorité du risque, souvent codé en vert (risque acceptable), jaune/orange (modéré) ou rouge (critique). (Cox, 2008)

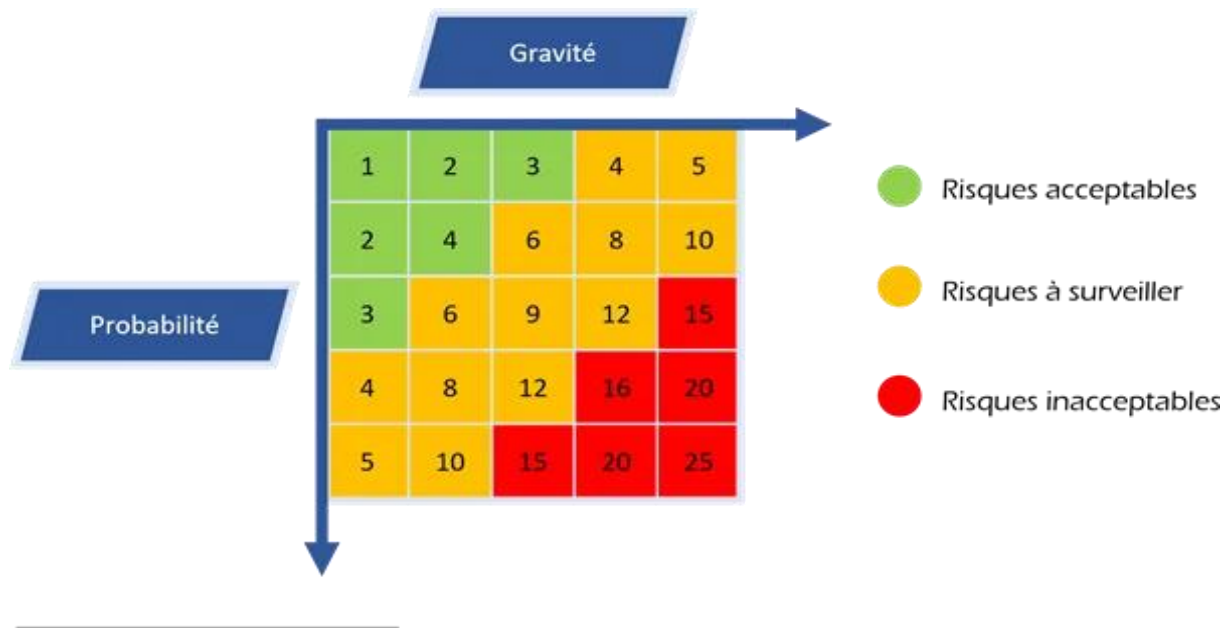


Figure 1.5: Une matrice de risque. (Bitrix24, 2024)

5.2. AHP (Analytic Hierarchy Process) : Une Méthode de Hiérarchisation et de Priorisation

5.2.1. Définition

La méthode d'aide à la décision multicritères, développée par Thomas L. Saaty dans les années 1970, repose sur la décomposition d'un problème complexe en une hiérarchie de sous-problèmes plus simples. Cette approche facilite l'analyse et la comparaison des différentes options en structurant la hiérarchie en plusieurs niveaux : l'objectif principal, les critères et sous-critères, ainsi que les alternatives. Chaque élément est évalué par des comparaisons par paires, ce qui permet de déterminer leur importance relative et d'identifier la meilleure option. (Rivest, 2019)

Ceci est en général, et nous allons détailler et approfondir davantage cette méthode dans le deuxième chapitre

Conclusion

En définitive, ce chapitre a permis de développer une compréhension approfondie des fondements théoriques qui soutiennent la gestion des risques dans le secteur industriel. À travers l'analyse des notions essentielles, du cadre réglementaire et normatif, ainsi que des différentes étapes du processus de gestion des risques, il a été possible de mettre en évidence les outils méthodologiques mobilisés dans l'évaluation et la prévention des dangers. Par ailleurs, une attention particulière a été portée sur les limites des approches classiques, qui montrent leurs faiblesses face à la complexité croissante des systèmes industriels modernes. Cette réflexion ouvre ainsi la voie à l'adoption de démarches combinées, plus robustes et intégrées, qui feront l'objet d'un approfondissement dans les chapitres suivants.

Chapitre 02 : La Méthode Nœud Papillon et la Méthode AHP pour la Gestion des Risques

Introduction

Dans le domaine industriel, la gestion des risques est un outil essentiel pour garantir la sécurité des opérations, des personnes et des infrastructures. Plusieurs méthodes sont utilisées pour analyser et évaluer les risques, parmi lesquelles la méthode Nœud de Papillon et la méthode AHP se distinguent comme des approches efficaces.

La méthode du Nœud de Papillon offre une représentation visuelle claire qui relie les causes des risques à leurs conséquences, tout en identifiant les barrières nécessaires pour les prévenir ou les atténuer, de son côté, la méthode AHP aide à la prise de décision en structurant les critères et en hiérarchisant les priorités de manière objective et méthodique.

Ce chapitre a pour objectif d'expliquer les principes fondamentaux de ces deux méthodes, de décrire leurs étapes de mise en œuvre et d'explorer leur intégration pour une gestion des risques industrielle efficace et complète.

1. La Méthode Nœud de Papillon (Bow-Tie)

1.1. Historique et domaine d'application

Le Nœud Papillon est une approche de type arborescente largement utilisée dans les pays européens comme les Pays-Bas qui possèdent une approche probabiliste de la gestion des risques. Le Nœud Papillon est utilisé dans différents secteurs industriels par des entreprises comme SHELL qui a été à l'origine du développement de ce type d'outils.

Dans ce document, l'INERIS présente une version particulière du Nœud Papillon qu'il a été amené à adapter. **(B.DEBRAY, et al., 2006)**

1.2. Définition de la méthode

La méthode du nœud papillon est une approche d'analyse des risques qui associe un arbre de défaillances et un arbre d'événements autour d'un même événement redouté. Son principal avantage réside dans sa capacité à offrir une arborescence synthétique, permettant une vision complète des différentes séquences accidentelles envisageables. Dans le cadre des études de dangers menées par les industriels soumis à la réglementation des ICPE, cette méthode s'est imposée comme un outil essentiel pour l'analyse des scénarios d'accidents les plus critiques. **(IDDIR, 2020)**

1.3. Objectif de la méthode

La méthode du nœud papillon est particulièrement utile pour

EI	Evènement Initiateur	Cause directe d'une perte de confinement ou d'intégrité physique.	La corrosion, l'érosion, les agressions mécaniques, une montée en pression sont généralement des évènements initiateurs
ERC	Evènement Redouté Central	Perte de confinement sur un équipement dangereux ou perte d'intégrité physique d'une substance dangereuse	Rupture, Brèche, Ruine ou Décomposition d'une substance dangereuse dans le cas d'une perte d'intégrité physique
ERS	Evènement Redouté Secondaire	Conséquence directe de l'évènement redouté central, l'évènement redouté secondaire caractérise le terme source de l'accident	Formation d'une flaque ou d'un nuage lors d'un rejet d'une substance diphasique
Ph D	Phénomène Dangereux	Phénomène physique pouvant engendrer des dommages majeurs	Incendie, Explosion, Dispersion d'un nuage toxique
EM	Effets Majeurs	Dommages occasionnés au niveau des éléments vulnérables (personnes, environnement ou biens) par les effets d'un phénomène dangereux	Effets létaux ou irréversibles sur la population Synergies d'accident
Barrières ou Mesures de Prévention		Barrières ou mesures visant à prévenir la perte de confinement ou d'intégrité physique	Peinture anti-corrosion, Coupure automatique des opérations de dépotage sur détection d'un niveau très haut...
Barrières ou Mesures de Protection		Barrières ou mesures visant à limite les conséquences de la perte de confinement ou d'intégrité physique	Vannes de sectionnement automatiques asservies à une détection (gaz, pression, débit), Moyens d'intervention...

1.4.1. Analyse par arbre

Combinées entres-elles, les séquences accidentelles permettent d'élaborer une représentation arborescente des faits qui conduisent à l'accident.

Cette construction dont le point focal est l'évènement redouté central utilise le principe de nœud papillon ».

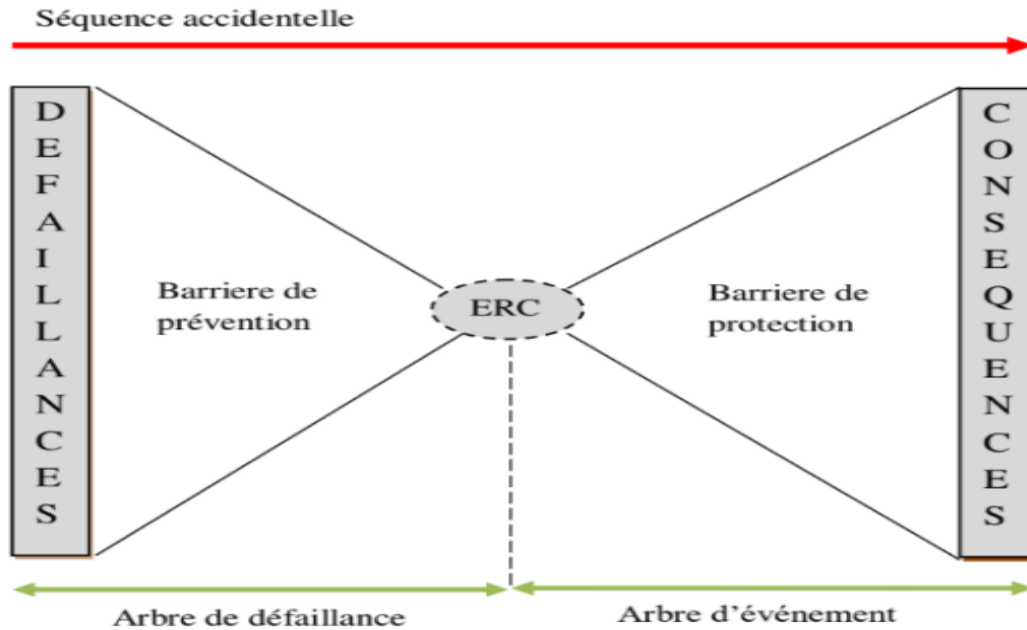


Figure 2.2 : Arbre du nœud papillon. (GUIDE DLI, 2008)

1.4.1.1. A gauche un arbre des défaillances

Il rassemble les événements initiateurs (EI) ou causes qui dans certaines conditions produisent l'événement redouté central. Ces causes sont multiples, mais conduisent toujours à la libération d'un danger ou d'une énergie. Elles peuvent être intrinsèques comme, par exemple, la corrosion ou l'érosion ; liées au procédé comme la surpression ou la dépression ; en relation avec le facteur humain comme une erreur de manipulation ou une mauvaise utilisation ou imputable à une agression externe comme les conditions climatiques (neige, vent, séisme) ou un choc (collision).

L'arbre générique figure en application de la méthode sous l'appellation < arbres des défaillances >.

1.4.1.2. A droite un arbre des événements

Il regroupe les conséquences auxquelles peut conduire un événement redouté central en fonction des conditions dans lesquelles il se produit et en fonction du taux de fiabilité ou de défaillance des barrières. Les événements redoutés secondaires (ERS) comme les épandages (liquide) ou les nuages (gaz volatil) et les phénomènes dangereux associés (incendie, explosion, pollution, ...) avec leurs effets (flux thermique, surpression, ...) font partie de cet arbre.

L'arbre générique figure en l'application de la méthode sous l'appellation arbre d'événements

». (GUIDE DLI, 2008)

1.5. Structure et les éléments du modèle nœud de Papillon

Un diagramme en nœud papillon bien construit se compose de 7 éléments clés. Comprendre ces éléments est essentiel pour créer une représentation efficace des risques. Examinons de plus près chaque élément et leur rôle dans une évaluation des risques en nœud papillon.

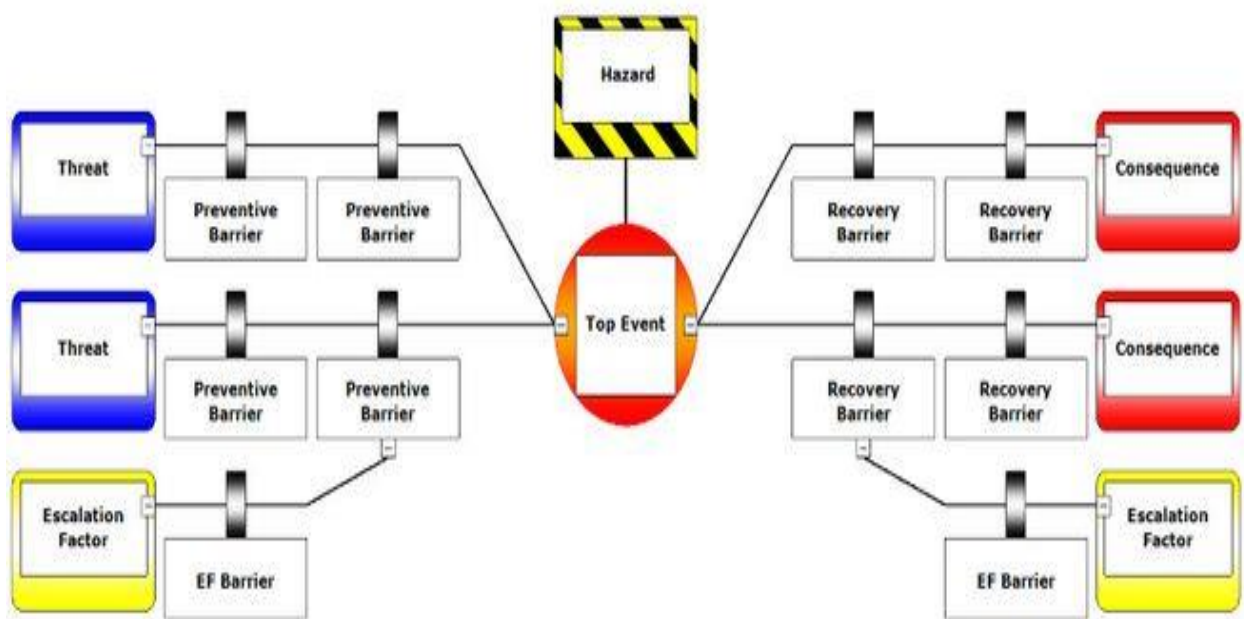


Figure 2.3: Modèle de nœud papillon. (kluwer, wolters, 2025)

1.5.1. Danger

Le danger est le point de départ du diagramme en nœud papillon. Il représente une source de préjudice potentiel, qu'il s'agisse d'une opération, d'une activité ou d'une matière. C'est un élément qui doit être contenu ou manipulé avec précaution afin d'éviter toute perte de contrôle.

1.5.2. Événement redouté

L'événement redouté est le point central du diagramme en nœud papillon. C'est le moment où le contrôle sur le danger est perdu, mais où les conséquences négatives ne se sont pas encore produites. L'événement redouté représente le « nœud » du diagramme, et tous les éléments

gravitent autour de la prévention de son occurrence ou de l'atténuation de ses effets une fois qu'il s'est produit.

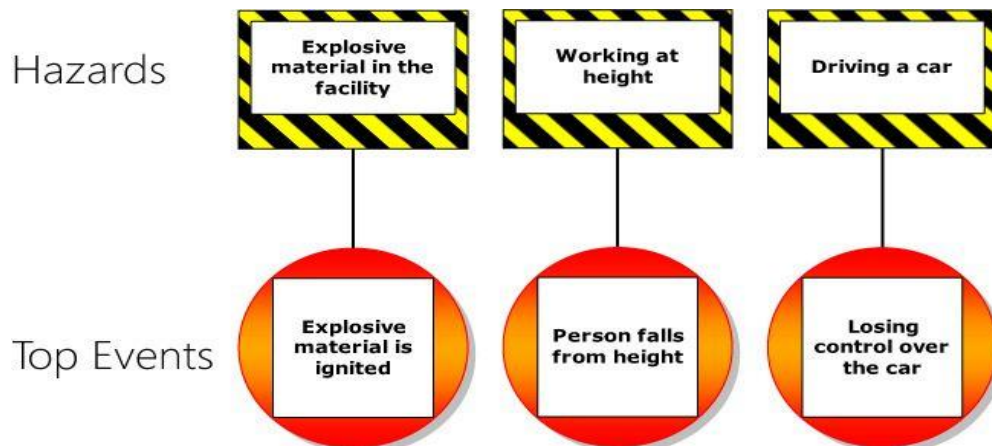


Figure 2.4: Événement redouté (kluwer, wolters, 2025)

1.5.3. Menace

Les menaces sont des sources de préjudice pouvant conduire à l'événement redouté. Elles peuvent résulter d'une défaillance, d'une influence externe ou de problèmes opérationnels. Cela inclut les dysfonctionnements du système, les erreurs humaines ou des facteurs externes qui augmentent la probabilité de survenue de l'événement redouté. Chaque menace doit, à elle seule, avoir la capacité de provoquer l'événement redouté.

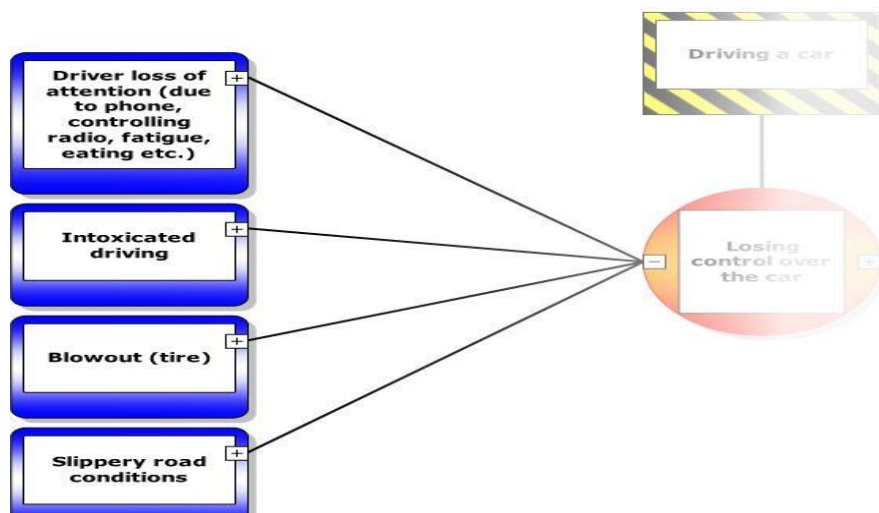


Figure 2.5 : Représente les menaces. (kluwer, wolters, 2025)

1.5.4. Conséquence

Les conséquences représentent les résultats indésirables pouvant découler de l'événement redouté. Elles peuvent varier, allant de dommages environnementaux à des blessures, une

atteinte à la réputation ou même une perte de vies humaines. Identifier et comprendre les conséquences potentielles est essentiel pour une gestion efficace des risques. Il est important de mesurer la gravité de chaque conséquence en utilisant une matrice de risques standard ou personnalisée.

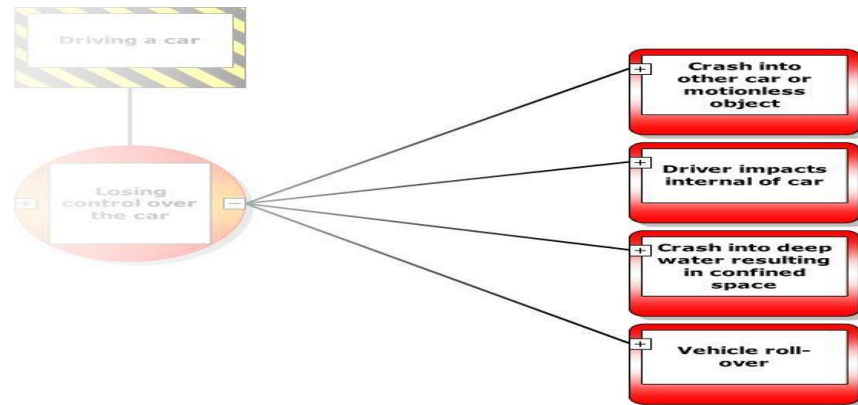


Figure 2.6: Représente les conséquences. (kluwer, wolters, 2025)

1.5.5. Barrière Préventive

Les barrières préventives sont les mesures mises en place pour empêcher la survenue de l'événement, situées sur le côté gauche du diagramme. Elles peuvent inclure des dispositifs de sécurité, des protocoles et des programmes de formation conçus pour maintenir le contrôle sur le danger. Si les barrières préventives fonctionnent comme prévu, les barrières d'atténuation n'ont pas besoin d'être déployées, et toutes les conséquences peuvent être évitées.

1.5.6. Barrière Mitigative

Les barrières mitigatives sont des contrôles et des stratégies visant à réduire les impacts des conséquences une fois que l'événement redouté s'est produit. Situées sur le côté droit du diagramme, elles jouent un rôle crucial dans la minimisation des dommages et facilitent une réponse efficace à l'incident. Nous ne pouvons pas toujours empêcher un incident de se produire, mais nous pouvons faire de notre mieux pour atténuer ses conséquences.

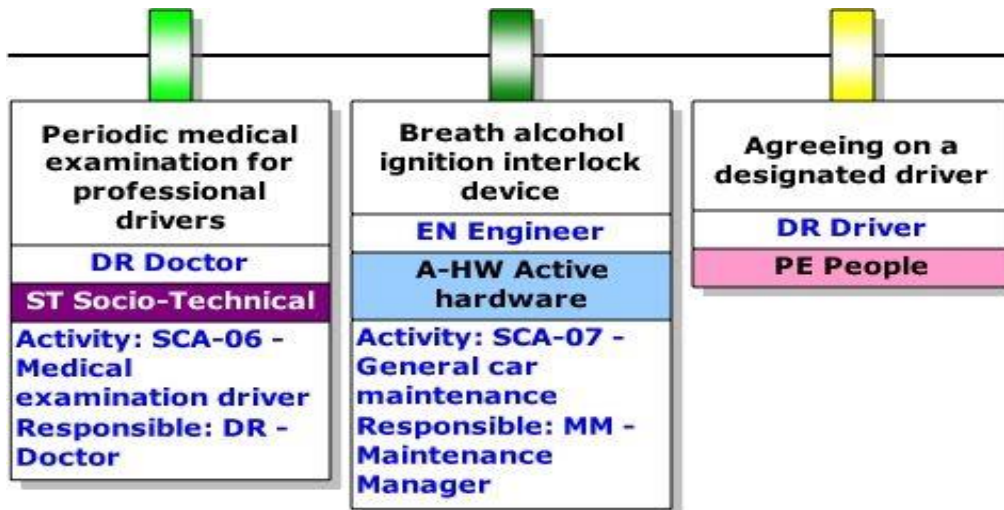


Figure 2.7 : les barrières. (kluwer, wolters, 2025)

1.5.7. Facteur de Dégradation

Les facteurs de dégradation, également appelés facteurs d'escalade, sont des conditions ou des situations qui peuvent compromettre l'efficacité des barrières. Ils doivent être utilisés avec parcimonie et ne représenter que les menaces les plus significatives pour l'intégrité des barrières. Les facteurs de dégradation diffèrent des menaces en ce sens qu'ils sont associés à une barrière spécifique. (kluwer, wolters, 2025)

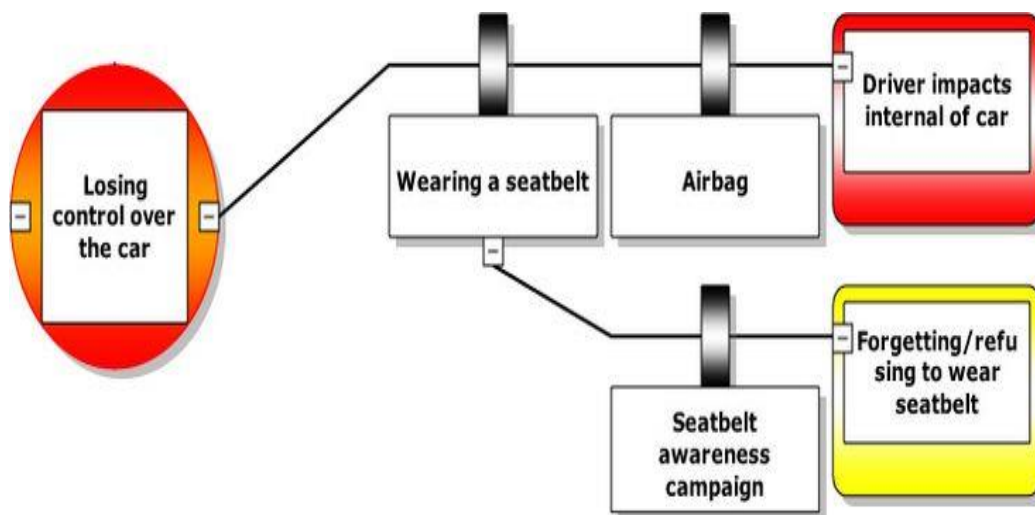


Figure 2.8: Facteur de Dégradation. (kluwer, wolters, 2025)

1.6. Les étapes de mise en œuvre de la méthode Nœud de Papillon

La méthode du nœud papillon couvre toutes les étapes du cycle de gestion des risques, y compris l'identification des dangers, l'analyse des risques, l'évaluation des risques et le

contrôle des risques.

Cette méthode permet d'obtenir une bonne vue d'ensemble d'un scénario d'événement indésirable.

Voici les principales étapes de sa mise en œuvre :

1. Identification du danger : la première étape est de définir le danger ou la situation dangereuse présente dans le système ou l'activité.
2. Définition de l'événement redouté (ou événement central) :
L'événement central, au centre du diagramme en nœud papillon, est l'événement ou la situation qui n'a pas encore eu de conséquences négatives, mais qui a entraîné une perte de contrôle du processus. Un événement central peut être déclenché par une ou plusieurs menaces.
3. Identification des menaces : Les menaces se trouvent dans la partie gauche du diagramme en nœud papillon. Ce sont les causes possibles qui peuvent conduire à l'événement central.
4. Identification des conséquences : L'événement central entraîne un certain nombre de conséquences, qui sont placées dans la partie droite du diagramme en nœud papillon.
5. Mise en place ou vérification des barrières préventives et des barrières de protection : consiste à identifier les barrières préventives (c'est-à-dire les barrières qui existent déjà sur le chemin des menaces pour empêcher leur déclenchement) et les barrières protectrices (c'est-à-dire les barrières qui existent déjà sur le chemin des menaces pour protéger contre les conséquences indésirables des menaces ou les atténuer) qui sont en place. (Abdi, Z, et al., 2016)

1.7. Bénéfices de la démarche Bowtie

- Visualisation concrète des scénarios ;
- Le schéma est lisible, à tous les niveaux de l'organisation afin de stimuler la communication entre les parties prenantes ;
- Mettre un lien direct entre le contrôle et les éléments de système de gestion de sécurité
- Image globale de plusieurs défaillances du système ;
- Illustrer des mesures correctives et préventives ;
- Anticipative (c'est de la prévention par excellence), Exhaustive, Objective et d'aide à la conception (risques détectés).

1.8. Limites de la méthode Bowtie

Chapitre 02 : La Méthode Nœud Papillon et la Méthode AHP pour la Gestion des Risques

- La validité des résultats obtenus est conditionnée très largement par les conditions de recueil et le choix des informations nécessaires :
 - Elle reste une méthode semi-quantitative elle permet d'estimer la probabilité finale de l'accident et non pas la quantification des événements initiateurs ;
 - Elles reposent exclusivement sur les compétences, l'intuition et la disponibilité des acteurs impliqués et nécessitent également une certaine objectivité de leur part.
- (DOULDJAMEL, 2016)**

2. La méthode AHP

2.1. Définition de la méthode

Le processus de hiérarchie analytique est l'une des méthodes MCDM les plus utilisées et aide à comprendre le problème et à choisir une décision qui correspond à l'objectif des spécialistes. Sa force réside dans sa facilité de compréhension en général. Le programme AHP désassemble d'abord le problème de décision d'origine dans une structure hiérarchique et contient l'objectif de décision, les alternatives, les critères et la comparaison pour obtenir les priorités de tous les éléments. **(Kulakowski, 2020)**

2.2. Principe de la méthode

La méthode Analytic Hierarchy Process (AHP) a été développée par SAATY en 1970 pour mettre à disposition une technique simple de résolution de problèmes complexes où le jugement et l'expérience de l'utilisateur y seraient intégrés, tout en accélérant et facilitant le processus de décision.

Depuis, cette méthode a été reconnue par ses utilisateurs comme étant l'une des trois plus populaires méthodes d'analyse quantitative traitant des facteurs qualitatifs.

2.3. Objectif de la méthode AHP

- Organiser les décisions complexes : Aider à structurer les problèmes lorsqu'il y a plusieurs critères à considérer, en les mettant dans une hiérarchie claire.
- Prioriser les critères : Permettre d'attribuer un poids à chaque critère en fonction de son importance par rapport aux autres.
- Comparer les alternatives : Évaluer chaque option sur la base des critères pour déterminer la meilleure solution parmi plusieurs.

Chapitre 02 : La Méthode Nœud Papillon et la Méthode AHP pour la Gestion des Risques

- Allier jugement humain et analyse mathématique : Combiner les opinions subjectives avec des calculs objectifs pour rendre la décision plus fiable.
- Aider à la gestion des risques : Permettre de mieux prioriser les actions à entreprendre, surtout dans des domaines comme la sécurité et la gestion des risques industriels. (tavana, et al., 2021)

2.4. Structure du modèle AHP

La méthode AHP repose sur une structure hiérarchique permettant de décomposer un problème complexe en éléments plus simples.

La structure typique du modèle AHP comprend les niveaux suivants :

- Objectif global : Il s'agit du but ultime de la décision à prendre.
- Critères : Ce sont les facteurs ou dimensions qui influencent la réalisation de l'objectif.
- Sous-critères (le cas échéant) : Ils affinent les critères principaux pour une évaluation plus détaillée.
- Alternatives : Ce sont les différentes options ou solutions envisageables pour atteindre l'objectif. (L. Saaty, 1988)

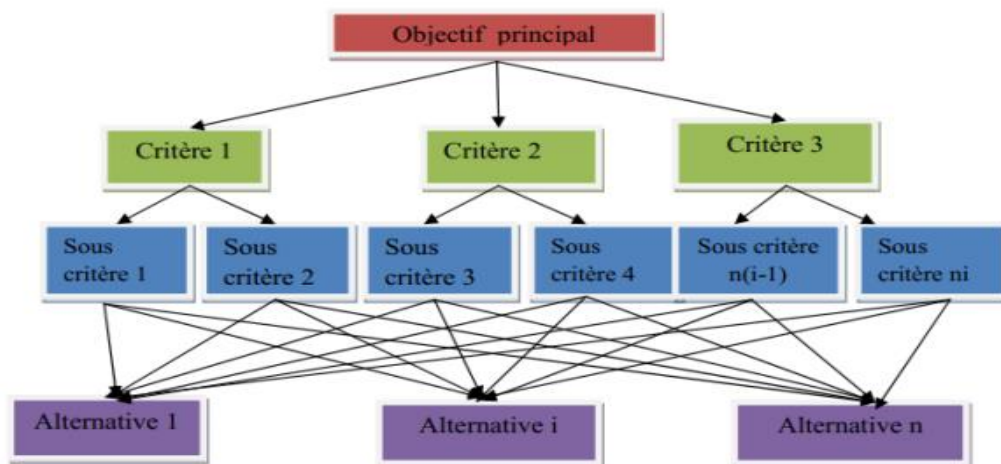


Figure 2.9: Structure du modèle AHP (L. Saaty, 1988)

2.5. Les étapes de la méthode AHP

Le programme AHP se déroule en quatre étapes pour obtenir l'installation de toutes les alternatives.

Étape 01 : Structurer le problème dans une hiérarchie

Dans sa première étape, il construit la racine du problème, la décision, et le deuxième niveau

Chapitre 02 : La Méthode Nœud Papillon et la Méthode AHP pour la Gestion des Risques

contient des critères qui représentent les différentes dimensions qui peuvent être considérées comme des alternatives.

Dans une hiérarchie plus complexe, les normes peuvent être plus divisées en sous-normes, sous-sous-normes, etc. ; Ainsi, il peut y avoir plus de niveaux supplémentaires ajoutés.

Cependant, la hiérarchie doit être d'au moins trois niveaux. (Pereyra-Rojas, et al., 2017)

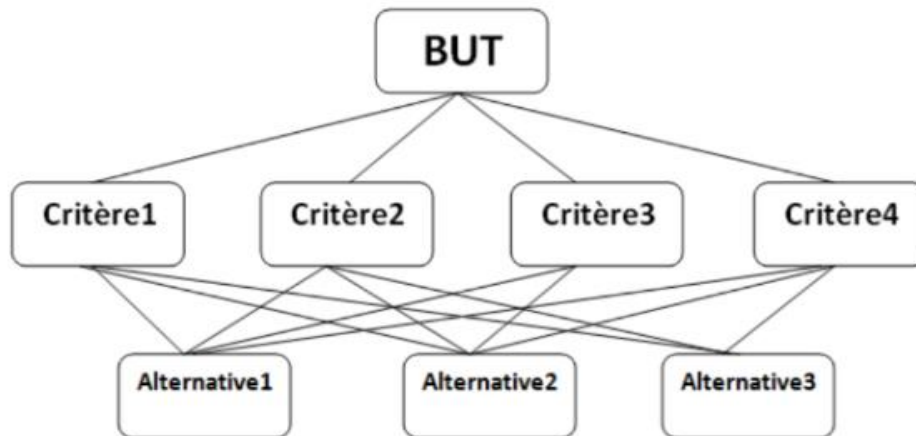


Figure 2.10: Structure de la hiérarchie AHP. (Pereyra-Rojas, et al., 2017)

Etape 02 : Effectuez le calcul de priorité

La deuxième étape consiste à calculer la priorité de chaque critère par rapport à l'objectif et la priorité de chaque alternative par rapport à un critère spécifique. La priorité est représentée par l'absolu un nombre entre zéro et un qui indique l'importance de chaque alternative par rapport à pour un critère spécifique et l'importance de chaque critère par rapport à l'objectif supérieur dans la résolution de problèmes. La technique utilisée pour calculer la priorité est appelée d'application Comparaison. Cette technique consiste généralement à comparer toutes les alternatives deux à deux avec Juger la meilleure alternative. (Pereyra-Rojas, et al., 2017)

Tableau 2.2 : L'échelle fondamentale pour la comparaison par paires dans l'AHP. (Pereyra-Rojas, et al., 2017)

Degré d'importance	Définition : L'échelle fondamentale pour la comparaison par paires dans l'AHP.
1	Importance égale
3	Importance modérée

5	Forte importance
7	Importance très forte
9	Importance extrême
<p>Les degrés 2, 4, 6 et 8 peuvent être utilisés pour exprimer des valeurs intermédiaires.</p> <p>Degrés de 1.1, 1.2, 1.3, etc.</p> <p>Peut être utilisé pour des alternatives qui sont très proches en importance</p>	

Etape 03 : Vérifier la cohérence de la matrice de comparaison par paires

La troisième étape consiste à vérifier la cohérence des matrices de comparaison par paires et nécessite le calcul de l'indice de cohérence (CI). Valeur propre de la matrice et n est le nombre de lignes indépendantes dans la matrice. Sila matrice est parfaitement cohérente alors :

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - N}{N - 1} \quad (1)$$

$$\lambda_{\max} = \sum_{j=1}^n \frac{(s.A)_j}{(n.A)_j} \quad (2)$$

Etape 04 : Synthétiser les priorités finales

La dernière étape consiste à résumer un ensemble de priorités globales afin de prendre la décision alternative finale.

Problèmes de décision complexes. Choisissez la meilleure décision parmi un certain nombre d'alternatives Il a été évalué selon plusieurs critères. Dans ce processus, les messages directs utilisent une simple comparaison par paires Dispositions pour le développement de priorités générales pour l'arrangement des alternatives. (Pereyra-Rojas, et al., 2017)

2.6. Les avantages de la méthode AHP

- Structuration claire : décomposition du problème en une hiérarchie logique, facilitant l'analyse.
- Combinaison de données : intégration d'informations qualitatives et quantitatives.
- Facilitation de la prise de décision en groupe : encourage la participation des parties prenantes et le consensus.

Chapitre 02 : La Méthode Nœud Papillon et la Méthode AHP pour la Gestion des Risques

- Analyse de sensibilité : évaluation de la robustesse des décisions face aux variations des poids des critères.

2.7. Les limites de la méthode AHP

- Subjectivité des jugements : les comparaisons par paires peuvent introduire des biais.
- Complexité croissante : le nombre de comparaisons augmente rapidement avec le nombre de critères et d'alternatives.
- Sensibilité aux incohérences : des jugements incohérents peuvent affecter la fiabilité des résultats.
- Dépendance à l'expertise : la qualité des résultats dépend de l'expérience des participants. (**L. Saaty, et al., 2001**)

3. Approche Intégrée Nœud de Papillon – AHP pour l'Optimisation de la Gestion des Risques.

3.1. Pourquoi combiner ces deux méthodes ?

- La méthode Bow-Tie permet de visualiser un scénario de risque (causes, les conséquences et les barrières de prévention et de protection). (**A. de Ruijter, et al., 2016**)
- La méthode AHP est une méthode de priorisation, facilite la hiérarchisation des risques et la sélection des actions de sécurité les plus cruciales en se basant sur divers critères tels que le coût, la gravité, la fréquence, etc. (**Saaty, 2004**)

3.2. Quelle est la méthode pour les combiner ?

- Tout d'abord, créer le schéma en Nœud de Papillon pour dresser un tableau précis du scénario de risque : déterminez l'événement principal, les menaces, les conséquences et les barrières en place.
- Ensuite, utilisez l'AHP pour comparer et prioriser les barrières ou les scénarios selon leur importance.

3.3. Quels sont les avantages ?

- Une prise de décision améliorée, parce qu'on peut voir les risques et identifier les barrières de sécurité les plus prioritaires à renforcer ou à mettre en place.
- Une perspective plus précise sur le système de sécurité ;
- Un perfectionnement des ressources, parce qu'on intervient d'abord là où c'est le plus requis. (**Ian Travers, et al., 2018**)

Conclusion

Ce chapitre a permis de mettre en lumière deux approches méthodologiques complémentaires et puissantes dans le domaine de la gestion des risques industriels : la méthode du Nœud de Papillon et la méthode AHP. La première offre une modélisation claire et visuelle des scénarios d'accidents, en identifiant à la fois les causes, les conséquences et les barrières de sécurité. Elle facilite la compréhension des risques complexes et renforce la communication entre les différents acteurs. La méthode AHP, quant à elle, permet une priorisation rationnelle et structurée des éléments de décision à travers des comparaisons par paires, en intégrant à la fois des données qualitatives et quantitatives.

La combinaison de ces deux méthodes constitue une stratégie robuste pour l'analyse et la gestion des risques, en associant modélisation descriptive et évaluation décisionnelle. Cette complémentarité sera exploitée dans le chapitre suivant, à travers une étude de cas appliquée à un scénario critique au sein de l'unité CP2K, démontrant ainsi la pertinence de ces outils dans un contexte industriel réel.

Chapitre 03 :
Présentation du complexe CP2K (POLYMED)

Introduction

Le complexe CP2K, situé dans la région industrielle de Skikda, est une infrastructure majeure de la pétrochimie en Algérie, opérée par Sonatrach. Inauguré en 1976, il occupe une position stratégique proche des infrastructures portuaires et des réseaux de transport d'hydrocarbures, facilitant l'approvisionnement en matières premières et l'exportation des produits finis.

Spécialisé dans la production de polyéthylène, notamment le polyéthylène haute densité (PEHD), CP2K a connu plusieurs phases de modernisation pour diversifier sa production et améliorer son efficacité. Il joue un rôle central dans la stratégie nationale visant à valoriser les ressources naturelles en produits à forte valeur ajoutée, tout en contribuant à la diversification économique et à la réduction de la dépendance aux exportations de matières premières brutes. En intégrant pleinement la chaîne de valeur pétrochimique, CP2K reflète l'engagement de l'Algérie envers un développement industriel durable et une exploitation optimale de ses ressources naturelles.

1. Présentation de complexe CP2K

Le complexe CP2K est une unité de production de polyéthylène à haute densité (PEHD) d'une capacité de 130000 tonne/an. Ainsi que la commercialisation de ce produit sur le marché local et international.

Le complexe CP2K utilise des matières premières comme :

- Éthylène : Il est importé et constitue l'une des principales matières premières pour la fabrication du PEHD.
- L'isobutane : Il provient de GLIK (probablement une autre unité de production) et est utilisé dans le processus de production du PEHD.
- Hexène en phase liquide : Il est importé et utilisé dans le processus de production pour apporter certaines propriétés au PEHD.
- Hydrogène : Il est utilisé comme modérateur de chaîne ou régulateur de la longueur de la chaîne dans le processus de polymérisation du PEHD.
- Catalyseur : Le catalyseur utilisé est l'oxyde de chrome (Cr_2O_3) supporté sur silice, importé. Son nom commercial est MAGNAPORE 963, et il est fourni par les États-Unis. (Unité CP2K, 2025)



Figure 3.1: complexe de CP2K. (Unité CP2K, 2025)

2. Historique de l'unité

Dans l'année 1988 l'ENIP et REPSOL décident d'inclure le projet PEHD dans le cadre de leur coopération, 1989 le projet est inscrit sur la liste des projets prioritaires du gouvernement algérien et REPSOL confirme sa décision de participer à une société créée autour du projet PEHD. En mars 1990 un protocole d'accord est signé entre ENIP et REPSOL par la suite méditerranéenne POLYMED a été créé en décembre de la même année. En avril 1991 fut la signature d'un contrat de réalisation du projet avec un consortium de trois sociétés espagnoles : INITEC, DRAGADOS, TECNICA REUNIDAS. La mise en place du financement espagnol a duré 4 ans de 1991 à 1995.

En 1995 reprises des travaux d'engineering, puis en 1996 ouvertures du chantier. En 1997 lancements des travaux de génie civil et infrastructures. Et en 1998 lancements de travaux de montage de l'usine. En 2002 l'achèvement de la construction de l'usine au mois de mars par la suite la signature de la restructuration financière de POLYMED au niveau de la chefferie du gouvernement. En 15 juin 2003 examen du dossier de POLYMED par un conseil interministériel et accord du chef du gouvernement pour le plan restructuration financière de POLYMED, en 16 janvier 2004 libération du financement SONATRACH pour le reste à réaliser et le démarrage de l'usine de POLYMED, en janvier 2011 ENIP est réintégré au groupe Sonatrach à 100% sous forme d'une division pétrochimique (PEC) ainsi l'usine de POLYMED sous une nouvelle appellation (CP2K). **(Unité CP2K, 2025)**

3. Implantation du CP2K

Le complexe CP2K est implanté à l'intérieur de la zone industrielle de Skikda, d'une superficie de 166800 m² 16,68 hectares dont 10% bâtis. IL se trouve sur la cote à 06 km à l'est de la ville de Skikda et à une hauteur moyenne d'environ 06m au-dessus de lamer

La position géographique de l'unité à l'intérieur de la zone est déterminée comme suit :

- Au nord : La mer méditerranée.
- Au sud : La route principale de la zone industrielle EGZIK.
- A l'est : Unité de dessalement et EGZIK.
- A l'ouest : Le complexe CP1K.



Figure 3.2 : Schéma d'occupation du sol du complexe CP2K. (Unité CP2K, 2025)

4. Découpage du complexe

Le complexe est composé de 04 principales zones définies comme suit :

- **Zone off site** : Les utilités (chaudière, air azote, eau dessalée, eau Anti-incendie, eau potable, et détente de gaz), Torche, Stockage isobutane et hexène, Traitement des eaux usées, Activation catalyseur.
- **Zone humide** : Traiteurs, Réacteur, Compresseur, Capacité.
- **Zone sèche** : Extrudeuse, Soufflantes, Silos de stockage du produit finis ((poudre et granulé).), Ensachage.
- **Zone bâtiment** : Bloc administration et direction, Cantine et vestiaires, Bloc sécurité et infirmerie, Magasin pièces de rechange, ateliers et bloc technique, Sous station haute et basse tentions, Salle de contrôle procès et laboratoire,

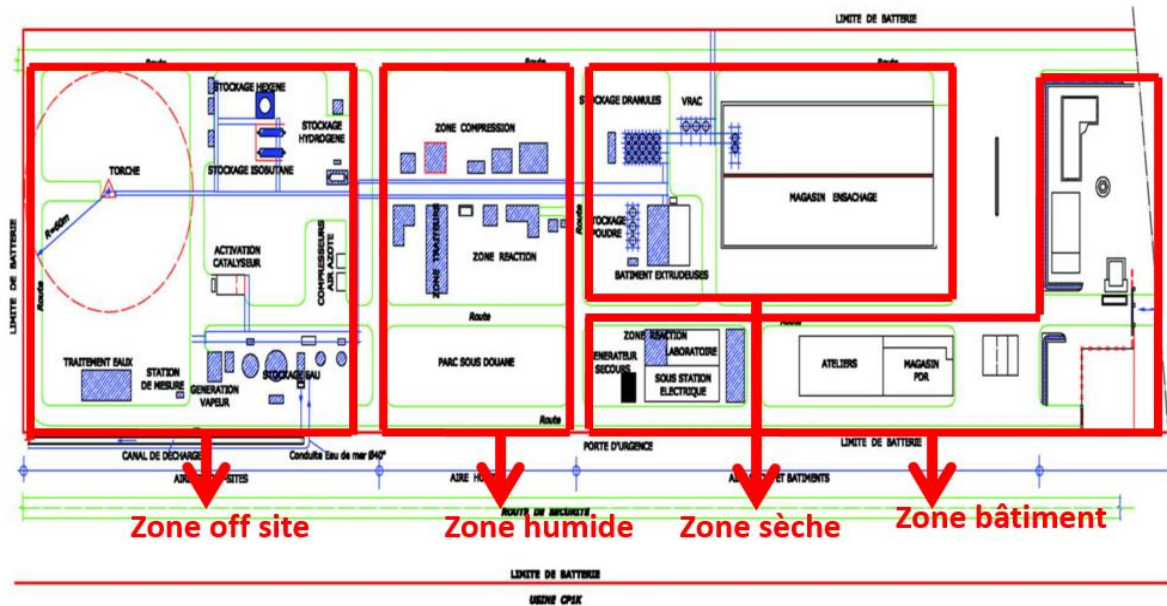


Figure 3.3: photo représente les zones qui existe dans le complexe. (Unité CP2K, 2025)

5. Les principales installations du complexe

Les principales installations présentées dans l'usine sont :

- Unité de préparation et de traitement des matières premières.
- Réacteur où se déroulent la polymérisation et l'obtention du PEHD en poudre.
- Extrudeuse qui transforme la poudre en granulés.
- Stockage intermédiaire (capacité 3500 tonnes)



Figure 3.4: Photo représente les principales installations de l'unité CP2K. (Unité CP2K, 2025)

5.1. Installations auxiliaires

- Production de vapeur, électricité, air etc.....
- Traitement des effluents.
- Stockage des matières premières, utilités et additifs (eau, hydrogène, hexène, isobutane).
- Magasin de stockage de produit fini est d'une superficie de 18 000 m² soit une capacité 12000 tonnes. **(Unité CP2K, 2025)**

6. Mission du complexe

Le complexe CP2K a pour mission de mettre en place une unité de production de polyéthylène (PEHD) haute densité avec une capacité de 130 000 tonnes par ans. **(Unité CP2K, 2025)**

7. Le PEHD

7.1. Définition de produit

Le PEHD, abréviation de polyéthylène haute densité (HDPE en anglais), est un polymère largement utilisé dans diverses applications industrielles, sa formule chimique est C₂H₄. Il est couramment utilisé pour la fabrication de bouteilles, flacons, fûts, conteneurs, tuyaux, tubes, poubelles, et bien d'autres produits. Une des propriétés clés du PEHD est sa haute densité, ce qui lui confère une excellente résistance à la rigidité et à l'impact. Il est également résistant aux produits chimiques, à la corrosion, à l'abrasion et aux intempéries, ce qui en fait un matériau durable et adapté à une large gamme d'applications. Une autre caractéristique importante du PEHD est sa recyclabilité. Étant donné qu'il s'agit d'un thermoplastique.

En résumé, le PEHD est un polymère polyvalent largement utilisé dans l'industrie en raison de ses propriétés mécaniques, de sa résistance chimique et de sa recyclabilité, ce qui en fait un choix privilégié pour de nombreuses applications. **(PlasticsEurope, 2020)**



Figure 3.5: Produit final (polyéthylène). (PlasticsEurope, 2020)

8. Description du procédé

La production de polyéthylène à haute densité à partir d'éthylène en tant que principale matière première, est basée sur le procédé PHILLIPS Petroleum Co. (procédé à particules), lequel consiste essentiellement dans la polymérisation catalytique de l'éthylène dans un réacteur tubulaire, continu, en phase liquide (formant une suspension dans de l'isobutane). La réaction chimique fortement exothermique (800 Kcal/Kg approx.) a lieu à une température se situant dans l'intervalle 85-110 C et à une pression de 42-44 kg/cm².

Les courants d'alimentation au réacteur (éthylène, isobutane, hydrogène et hexène-1, dans le cas de production de copolymères) exigent un haut degré de pureté, pour ce, ils sont préalablement traités afin d'éliminer les poisons éventuels du catalyseur (fondamentalement acétylène, oxygène, et eau) jusqu'à obtenir des teneurs résiduelles non nuisibles.

Ceci s'effectue dans des traiteurs catalytiques appropriés, dans le cas de l'éthylène, colonnes de dégazage, isobutane et hexene-1, et des sécheurs spécifiques pour tous les courants.

Le catalyseur de la réaction de polymérisation peut être de deux types, selon le produit à fabriquer.

Le type PF (Phillips) demande un procédé préalable d'oxydation sur lit fluidifié au moyen d'air chaud sec, à des températures atteignant 982 C.

Le type XPF (Ziegler) s'alimente au réacteur de la manière commerciale.

Chapitre 03 : Présentation du complexe CP2K (POLYMED)

Dans les deux cas, il est dose suivant une proportion appropriée, comme "slurry" avec de l'isobutane.

Le réacteur est composé de deux boucles tubulaires unies à la base, ayant quatre pattes verticales chemisées. Une pompe à fluide axial insérée à la base du réacteur provoque la circulation continue du fluide à l'intérieur du tube. Comme la réaction est exothermique, la chaleur produite est éliminée par de l'eau de réfrigération, dans un circuit fermé, circulant dans la chemise du réacteur, en échangeant la chaleur à travers de l'isobutane qui agit comme agent transmetteur de la chaleur de réaction.

Près du réacteur se trouve un réservoir de réception du contenu de celui-ci pour les cas d'émergence panne du système de circulation du réacteur, obstruction des lignes de décharge du réacteur, etc.

Le mélange (slurry") polymère-isobutane est extrait continuellement (par séquences) à travers des vannes de décharge, disposées sur les pattes de décantation du réacteur et des lignes de transfert, jusqu'au réservoir ou chambre de flash.

Pendant ce transvasement, le produit se dépressurise jusqu'à une pression proche de l'atmosphérique (0.8 kg/cm² g), produisant la séparation de la majorité de l'isobutane, grâce à sa vaporisation.

Les vapeurs d'hydrocarbure résiduelles sont éliminées dans le sécheur transporteur situé à la décharge inférieure de la chambre de flash, ainsi que dans la colonne de vidange. Concernant le premier, il s'agit d'un sécheur à évaporation, horizontal, équipé d'une vis transporteuse du produit et indirectement chauffé avec de la vapeur à basse pression.

Le polymère séché tombe par gravité à l'intérieur de la chambre de vidange à la base de laquelle on injecte de l'azote pour séparer les traces d'hydrocarbure.

Le mélange d'isobutane et de l'azote N₂ extrait de cette chambre est soumis à un procédé de distillation pour la réutilisation de nouveau des deux fluides dans le procédé.

Le procédé de réaction est complété par le système de recyclage d'isobutane, qui consiste dans la récupération, purification et recirculation du diluant au réacteur.

Le procédé de particules est basé sur la réutilisation de l'isobutane et du co-monomère avec une faible teneur en impuretés (poisons du catalyseur).

Le gaz de sortie de la chambre de flash, passe à travers d'un filtre à manches et un filtre de garde avant l'aspiration du compresseur à deux étapes qui élève la pression jusqu'à la pression de service de la colonne deshexaniseuse, 6.6 kg/cm² g environ.

L'isobutane, produit de tête, est recomprimé jusqu'à quelques 15.5 kg/cm² g et s'alimente au système d'élimination de C₂ (colonnes dééthaniseuses).

Chapitre 03 : Présentation du complexe CP2K (POLYMED)

Les extractions latérales des colonnes dééthaniseuse et deshexaniseuse se recirculent au réacteur, avec élimination préalable des contaminants indésirables, comme l'isobutane purifié (alimentation principale de dissolvant) et l'hexène-1, respectivement.

L'extraction de fond de la colonne dééthaniseuse constitue l'isobutane alimenté pour la formation de "slurry" de catalyseur, après traitement pour éliminer les impuretés.

Le polyéthylène produit est transporté sous forme de poudre de la décharge de la colonne de vidange, jusqu'à des silos de stockage ou au réservoir d'alimentation à extrusion, par l'intermédiaire de soufflantes.

Un système de transport pneumatique est constitué en circuit fermé d'azote, à pression positive.

Le système permet aussi l'envoi de poudre des silos au réservoir d'alimentation à extrusion.

Le polyéthylène sous forme de poudre est soumis à un procédé de finissage qui consiste essentiellement à lui donner la forme finale pour la vente du produit (granulés ou "pellet") et la teneur d'additifs spécifiques que chaque formulation ou degré de PEHD exige.

L'alimentation à l'extrudeuse est effectuée par un système de dosage et mélange de grande précision des différents composants de poudre, additifs à l'état solide (dans une proportion de 0.1 à 0.8% en poids) et, le cas échéant, pellet. C'est dans l'installation d'extrusion que s'effectuent la fusion et la granulation du polymère ajouté.

La température de fusion du produit est de l'ordre de 250-275 °C, qui est atteinte par chauffage électrique et par huile thermique. La pelletisation est réalisée en circuit fermé d'eau sous pression.

A la sortie de l'extrudeuse l'eau est séparée du produit par séchage par centrifugation, et il est ensuite passé au crible pour être classifié par tailles, la taille souhaitée étant celle qui correspond à l'obtention de 40-50 pellets par gramme.

Le polyéthylène produit est transporté pneumatiquement pour son homogénéisation aux silos mélangeurs par des soufflantes, à pression positive. A partir de là, il peut être transféré par un autre système de soufflantes à des silos de chargement en vrac de camions, à des silos de stockage ou aux silos d'alimentation aux lignes d'ensachage et de palettisation. (**Manuel opératoire, 2025**)

9. Grades du PEHD produit au niveau de CP2K

Etant donné que le PEHD trouve un bon nombre d'applications, comme la fabrication des pipes, des films plastiques pour différents usages, bouteilles, etc. des grades différents

Chapitre 03 : Présentation du complexe CP2K (POLYMED)

doivent être produits. Ainsi, le complexe CP2K propose toute une gamme de PEHD comportant neuf grades différents. Ces derniers sont caractérisés par leur indice de fluidité et leur densité, qui sont rapportés dans le tableau suivant.

Tableau 3.1: Les différents grades du PEHD produits au niveau de CP2K et ses utilisations.
(Unité CP2K, 2025)

Grade	Indice de fluidité (Poudre/granulé)	La densité	L'utilisation
TR 402	0,11-0,19/0,08-0,14	0,9430-0,9460	PIPE : (Tube Eau).
TR 418	-	-	Tube Gaz
5502	0,55-0,70 /0,27-0,43	0,9530-0,9580	Soufflage : des bouteilles de petite et grande taille
TR 140	0,33-0,48/0,20-0,36	0,9430-0,9480	FILM : Usage Général toute sacherie
TR 144	0,25-0,38/0,14-0,24	0,9420-0,9470	FILM : Usage Général toute sacherie
6080	7,0-10,0/6,80-9,20	0,9590-0,9650	Injection : Palette, caisse, bidon, bouchon, casier, articles de ménage
6030	2,0-3,80/1,80-3,20	0,9590-0,9650	Injection : Palette, caisse, bidon, bouchon, casier, articles de ménage
6040	3,0-5,80/2,80-5,20	0,9590-0,9650	Injection : Palette, caisse, bidon, bouchon, casier, articles de ménage
6006L	0,80-1,15/0,47-0,73	0,9570 min	Soufflage : des bouteilles de petite et grande taille

Conclusion

En conclusion, l'unité CP2K se distingue comme un pilier incontournable dans le domaine de la pétrochimie au sein de Sonatrach, grâce à sa spécialisation dans la production de polyéthylène haute densité (PEHD). Ce matériau, largement utilisé dans divers secteurs industriels tels que l'emballage, les tuyauteries et les pièces techniques, témoigne de l'importance stratégique de cette unité dans la chaîne de valeur des hydrocarbures. L'étude de cette unité a permis de mettre en lumière non seulement ses capacités techniques et son rôle dans la valorisation des ressources locales, mais également son impact sur le développement économique à travers la diversification des produits à forte valeur ajoutée. Cela souligne l'importance de poursuivre les efforts d'optimisation et d'innovation pour maintenir la

Chapitre 03 : Présentation du complexe CP2K (POLYMED)

compétitivité de CP2K sur les marchés internationaux.

**Chapitre 04 : Application de La Méthode Nœud Papillon et la
Méthode AHP sur réacteur chimique**

Introduction

Ce chapitre, consacré à l'étude pratique, fait suite aux développements théoriques présentés dans les chapitres précédents. Il se concentre sur la mise en œuvre intégrée des méthodes Bow-Tie et AHP dans un cadre industriel réel, en vue d'analyser et de gérer les risques majeurs de manière structurée et efficace.

L'approche intégrée proposée vise à combiner la capacité descriptive et structurante de la méthode Bow-Tie avec le pouvoir décisionnel multicritère de la méthode AHP, afin d'identifier, d'évaluer et de hiérarchiser les mesures de maîtrise des risques de manière rigoureuse et rationnelle.

L'objectif principal de ce chapitre est d'appliquer ces deux outils complémentaires à un cas concret, dans le but d'illustrer leur pertinence dans un environnement industriel réel. La méthode Bow-Tie permet de représenter de manière visuelle et logique la chaîne causale d'un événement redouté, ainsi que les barrières de prévention et de protection associées. Quant à la méthode AHP, elle est mobilisée pour prioriser les mesures à mettre en œuvre, en tenant compte de critères tels que l'efficacité, le coût, la faisabilité technique et le délai d'exécution.

Dans les sections qui suivent, nous présenterons d'abord les objectifs de l'étude pratique et la description du cas choisi, avant de passer à l'application détaillée de chaque méthode et à l'interprétation des résultats obtenus. Ce travail aboutira à un plan d'action structuré visant à optimiser la gestion du risque identifié et à renforcer la résilience du système étudié.

1. Objectifs de l'étude pratique

L'objectif principal de cette étude pratique est de démontrer l'intérêt et la complémentarité des méthodes Bow-Tie et AHP dans l'analyse et la gestion des risques industriels majeurs. Il s'agit d'appliquer ces deux approches à un cas concret afin de :

- Identifier et modéliser un événement redouté à travers une représentation claire des causes, des conséquences et des barrières de sécurité à l'aide de la méthode Bow-Tie ;
- Visualiser la chaîne causale d'un scénario accidentel de manière structurée afin de faciliter la compréhension des mécanismes de défaillance ;
- Évaluer les mesures de maîtrise des risques existantes et en proposer de nouvelles, si nécessaire ;
- Prioriser ces mesures de maîtrise à l'aide de la méthode AHP, en tenant compte de plusieurs critères de décision tels que l'efficacité, le coût, la faisabilité technique et le délai de mise en œuvre ;

- Élaborer un plan d'action cohérent et fondé sur une approche multicritère, permettant d'améliorer le niveau global de sécurité de l'installation étudiée.

2. Description du cas pratique

Le réacteur de polymérisation 950-155 (PB-B-1020, PB-B-1023), situé dans l'unité CP2K du complexe pétrochimique de Skikda, est un équipement clé dans le processus de fabrication du polyéthylène en poudre. Il s'agit d'un réacteur en boucle fermée fonctionnant en phase liquide, utilisé dans la polymérisation de l'éthylène pour la production de polyéthylène haute densité (PEHD) selon le procédé Phillips. Avec une capacité de 78,3 m³, ce réacteur constitue l'élément central de la réaction de polymérisation au sein de l'unité.

2.1. Caractéristiques principales

- Type et construction : boucle de tuyauterie de 304 mètres, composée de quatre tronçons verticaux et horizontaux, en acier au carbone.
- Dimensions : diamètre interne de 560 mm.
- Conditions de fonctionnement : pression de design 56,3 kg/cm²g, température maximale de 142°C.
- Systèmes de contrôle : instrumentation intégrée via DCS pour la pression et la température.
- Dispositifs de sécurité : soupapes de sécurité, vannes de décharge d'urgence vers chambre de flashe alternatif, système de déluge, système de détection de gaz et de flammes,

2.2. Contexte de risque

Ce réacteur opère dans des conditions critiques de pression et de température, ce qui engendre un potentiel risque majeur d'accident industriel. En cas de défaillance ou de dysfonctionnement critique, un accident grave, tel qu'une explosion.



Figure 4.1: réacteur chimique. (Unité CP2K, 2025)

3. Fonctionnement du réacteur 950-155

3.1. Alimentation et Circulation

Le réacteur est alimenté par quatre matières premières :

- ✓ Éthylène : le composant principal pour la polymérisation.
- ✓ Hexène-1 : ajouté comme comonomère pour la production de copolymères.

- ✓ Isobutane : utilisé comme solvant, alimenté sous deux formes (frais et recyclé).
- ✓ Catalyseurs : comprenant des catalyseurs principaux et des co-catalyseurs.

Le liquide circule dans le réacteur à une vitesse d'environ 8,2 m/s, grâce à une pompe située à la base du réacteur. Les tuyaux en boucle comprennent des sections verticales et horizontales pour garantir un flux continu et homogène.

3.2. Processus de Polymérisation

- ✓ Type de réaction : une réaction chimique exothermique dégageant environ 800 kcal par kg de polymère.
- ✓ Température et pression : la température dans le réacteur varie entre 85 et 110 °C et la pression est maintenue autour de 42 kg/cm².
- ✓ Gestion de la chaleur : La chaleur générée par la réaction est dissipée à l'aide d'un système de refroidissement qui assure à la fois le chauffage et le refroidissement via des chemises entourant les sections verticales des tuyaux.

3.3. Mesures et Contrôle

Mesure de densité : effectuée à l'aide d'un appareil "Gamma Gauge", qui convertit la lecture en pourcentage de concentration du polymère.

Ajustements manuels et automatiques : l'opérateur peut ajuster manuellement la concentration de polymère ou utiliser le système de contrôle centralisé.

Le flux d'isobutane recyclé est ajusté pour maintenir la densité souhaitée.

3.4. Évacuation du Produit

Mécanisme d'évacuation : le polymère est évacué à travers des ouvertures équipées de vannes, qui contrôlent le débit lorsque la pression atteint 42,2 kg/cm².

Le polymère est ensuite dirigé vers la Chamber de flash où il est séparé de l'isobutane.

3.5. Optimisation du Processus et Sécurité

Surveillance des paramètres critiques : la température, la pression et la concentration d'éthylène sont surveillées en permanence.

On veille à ce que la concentration de particules solides ne dépasse pas 70%, seuil garantissant une circulation fluide.

Système de sécurité : en cas de panne, comme un bouchage des lignes de décharge ou une augmentation de la pression, le contenu du réacteur est transféré vers une chambre de flash

alternatif (secours), soupapes de sécurité, système de déluge, système de kill système de détection de gaz et de flammes

3.6. Gestion de la Chaleur et des Résidus

Les gaz résiduels issus de la réaction sont traités par un système de récupération de l'isobutane, permettant son recyclage pour une nouvelle utilisation. Cela améliore l'efficacité du processus et réduit la consommation de ressources.

4. Application de la méthode Bow-Tie

4.1. Événement redouté (Top Event) : Perte de confinement du réacteur 950-155.

4.2. Causes principales (partie gauche du nœud)

- ✓ Surchauffe du réacteur.
- ✓ Surpression dans le réacteur.
- ✓ Défaillance mécanique du réacteur.
- ✓ Défaillance du système de contrôle et d'instrumentation.

4.3. Conséquences possibles (partie droite du nœud)

- ✓ Explosion ou incendie.
- ✓ Arrêt total de la production.
- ✓ Exposition du personnel.
- ✓ Dommages matériels importants.
- ✓ Pollution de l'environnement.

4.4. Construction de l'arbre

Le côté gauche

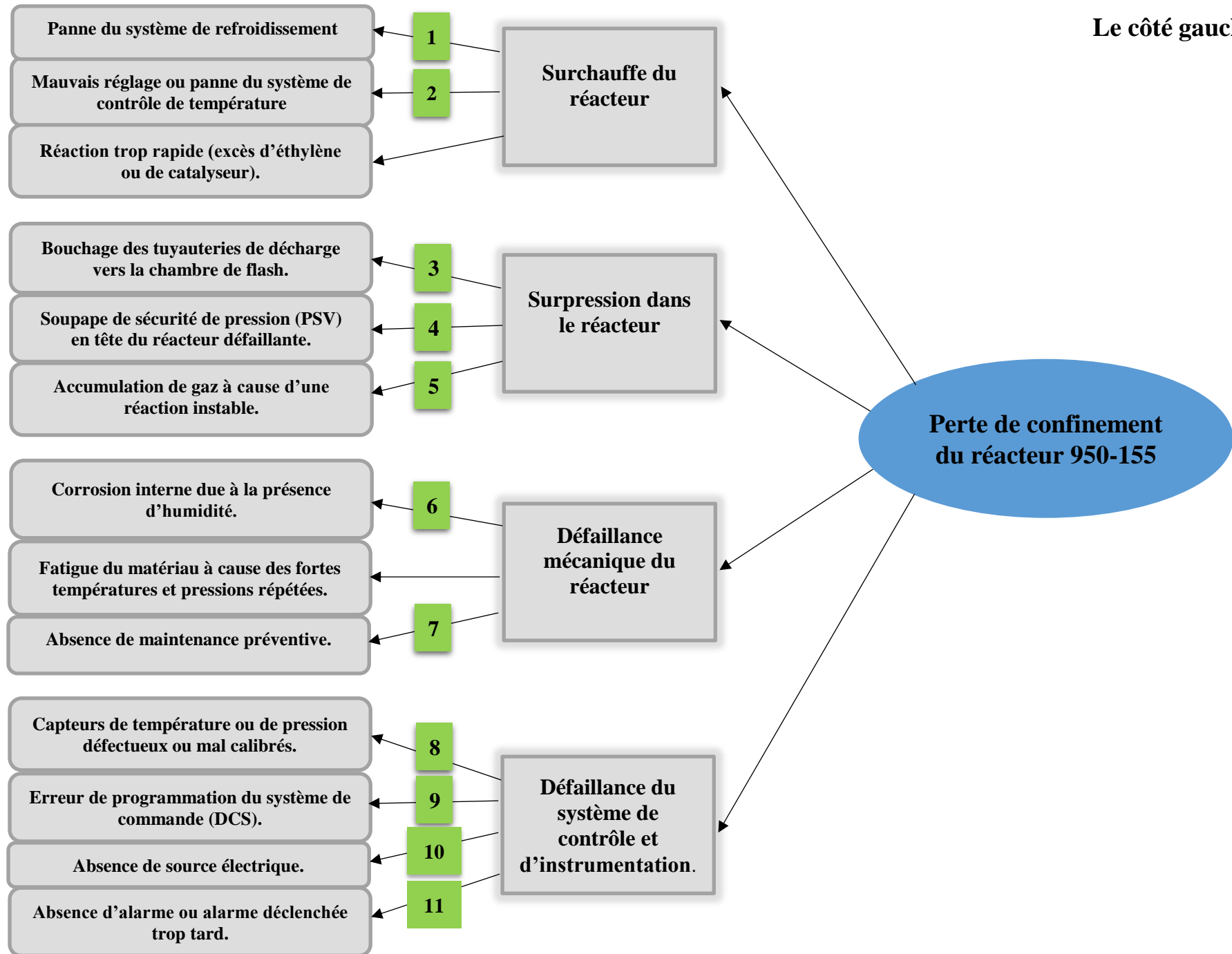


Tableau 4.1: Les barrières de prévention (entre causes et événement redouté)

Le symbole	La barrière de prévention
1	Maintenance régulière du système de refroidissement (pompe, échangeur, boucle fermée).
2	Surveillance automatique de la température via capteurs connectés au DCS.
3	Inspection et nettoyage régulier des lignes de décharge vers la chambre de flash.
4	Vérification périodique de la soupape de sécurité en tête du réacteur (PSV).
5	Contrôle de la pression par capteurs reliés au DCS avec alarmes hautes.
6	Contrôle par radiographie de l'intégrité des parois internes.
7	Inspection visuelle et technique périodique selon les normes internes.
8	Étallonnage régulier des capteurs de pression et température.
9	Tests de redondance et mise à jour du système DCS.
10	Système d'alimentation électrique de secours (UPS).
11	Audit périodique de la performance du système de contrôle.

Le côté droit

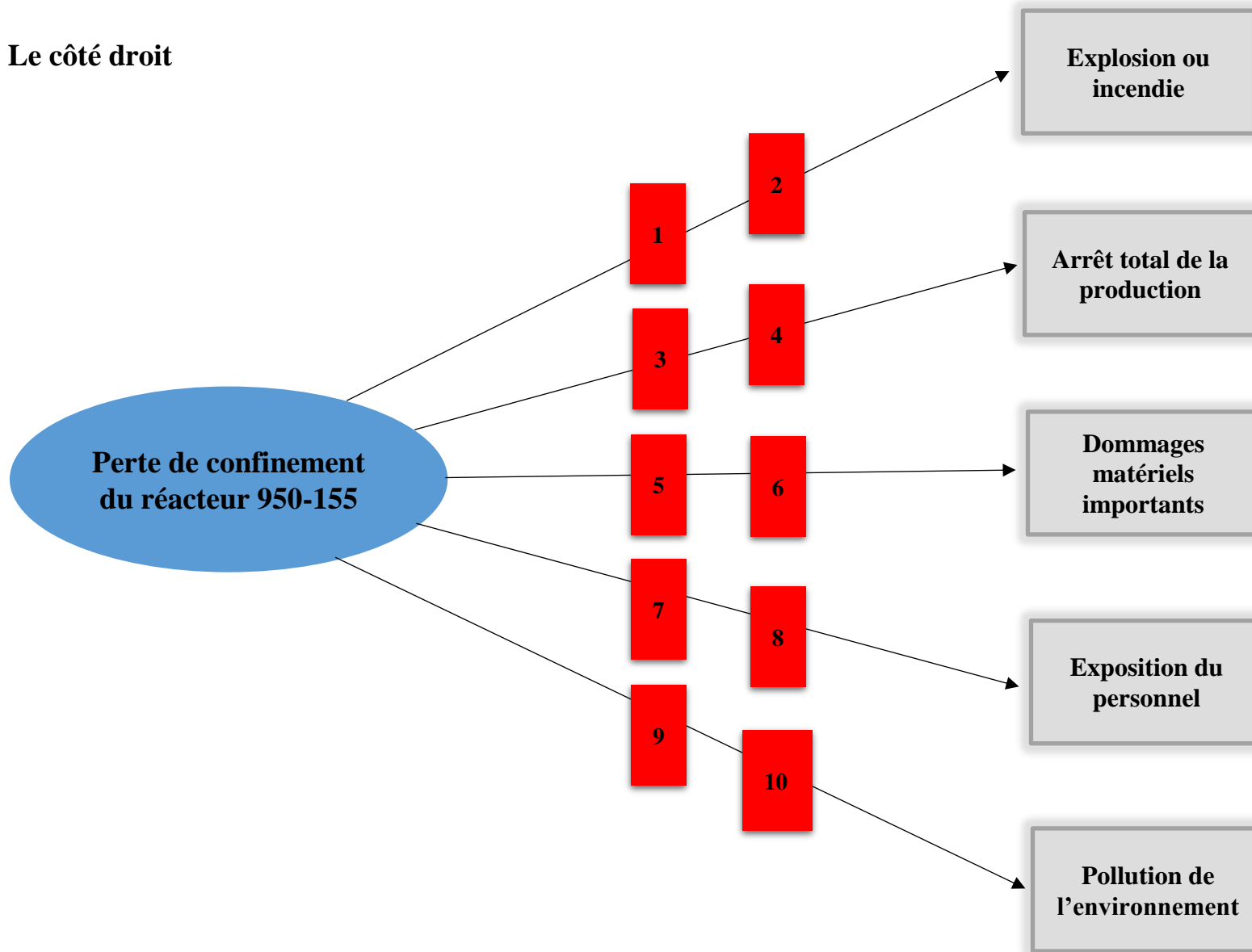


Tableau 4.2: Les barrières de protection (entre événement redouté et conséquences).

Le symbole	La barrière de protection
1	Système de déluge ou rideaux d'eau autour des zones sensibles.
2	Système de kill
3	Mise en place de procédures d'arrêt contrôlé.
4	Redondance des équipements critiques pour reprise rapide.
5	Systèmes de limitation de surpression (PSV + disques de rupture).
6	Inspection post-incident automatique via capteurs intégrés.
7	Port obligatoire d'EPI (appareils respiratoires, combinaisons anti-flammes)
8	Système d'alarme sonore/lumineuse pour évacuation rapide
9	Cuves de rétention et drainage dirigé vers station de traitement.
10	Système de torchage (flare) pour brûler les rejets d'urgence.

5. Application de la méthode AHP

5.1. Application de la méthode AHP aux barrières de prévention

À partir de l'analyse Bow-Tie du scénario de perte de confinement du réacteur 950-155, 11 barrières de prévention ont été identifiées.

La méthode AHP est appliquée dans ce travail pour classer ces barrières et sélectionner les quatre plus importantes à recommander.

L'évaluation des barrières de protection pourra faire l'objet d'une étude future.

5.2. Définition de l'objectif

Dans le cadre de l'analyse des risques, il est essentiel de prioriser les barrières les plus efficaces afin de renforcer la prévention. Cette étape vise à évaluer les barrières identifiées dans le Bow-Tie.

L'objectif est : "Identifier les 4 barrières les plus efficaces."

5.3. Choix des critères

Afin d'évaluer les barrières de prévention identifiées, quatre critères simples et cohérents avec leur nature ont été sélectionnés :

- ✓ **Facilité de mise en œuvre** : simplicité d'installation et d'intégration de la barrière dans le système existant.
- ✓ **Efficacité technique** : capacité de la barrière à empêcher directement la survenue du danger.
- ✓ **Fiabilité** : stabilité de la barrière dans le temps et sa résistance aux défaillances.
- ✓ **Coût** : ressources financières nécessaires pour l'installation et le fonctionnement de la barrière.

5.4. Sélection des alternatives

Les alternatives analysées dans le cadre de cette méthode AHP correspondent aux barrières de prévention identifiées lors de l'analyse Bow-Tie appliquée au scénario de perte de confinement du réacteur 950-155.

Au total, onze (11) barrières de prévention ont été recensées, couvrant des aspects techniques, organisationnels et instrumentaux.

Voici la liste des alternatives considérées :

1. Maintenance régulière du système de refroidissement.

2. Surveillance automatique de la température (capteurs – DCS).
3. Inspection et nettoyage des lignes de décharge.
4. Vérification périodique de la soupape de sécurité (PSV).
5. Contrôle de la pression par capteurs avec alarmes.
6. Contrôle par radiographie de l'intégrité interne.
7. Inspection visuelle et technique périodique.
8. Étalonnage régulier des capteurs (pression, température).
9. Tests de redondance et mise à jour du système DCS.
10. Système d'alimentation électrique de secours (UPS).
11. Audit périodique de la performance du système de contrôle.

5.5. Construction de la hiérarchie

La méthode AHP repose sur une structure hiérarchique composée de trois niveaux

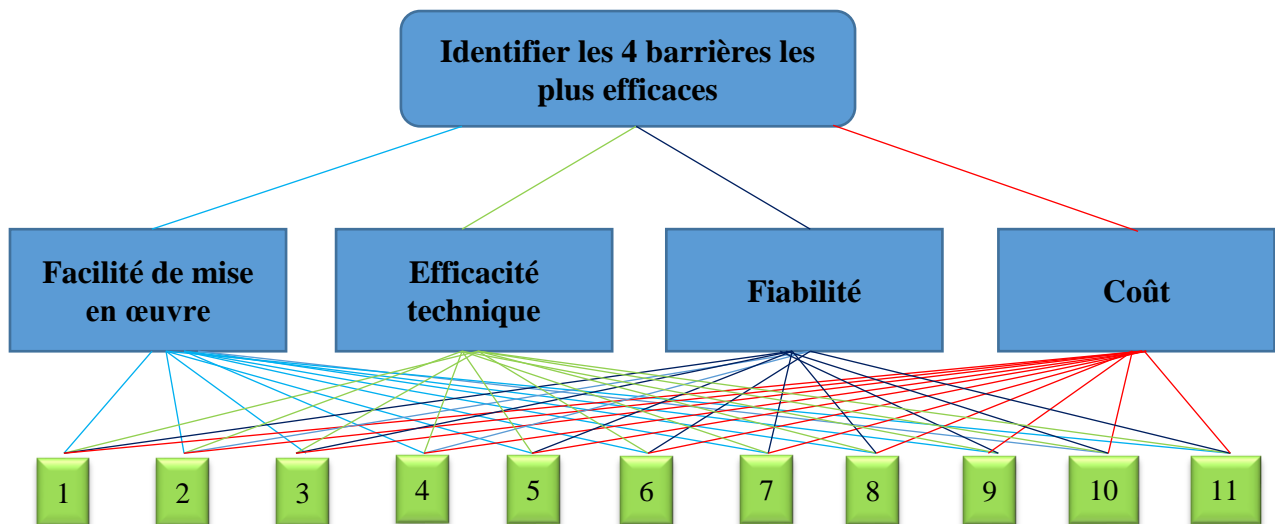


Figure 4.2: structure hiérarchique

5.6. Mise en œuvre de la méthode AHP à l'aide du logiciel SuperDecisions

Afin d'appliquer la méthode AHP, le logiciel SuperDecisions a été utilisé. La mise en œuvre se fait en plusieurs étapes successives :

➤ **Étape 1 : Ouverture du logiciel et affichage de l'interface**

Le logiciel SuperDecisions est lancé pour accéder à son interface principale.

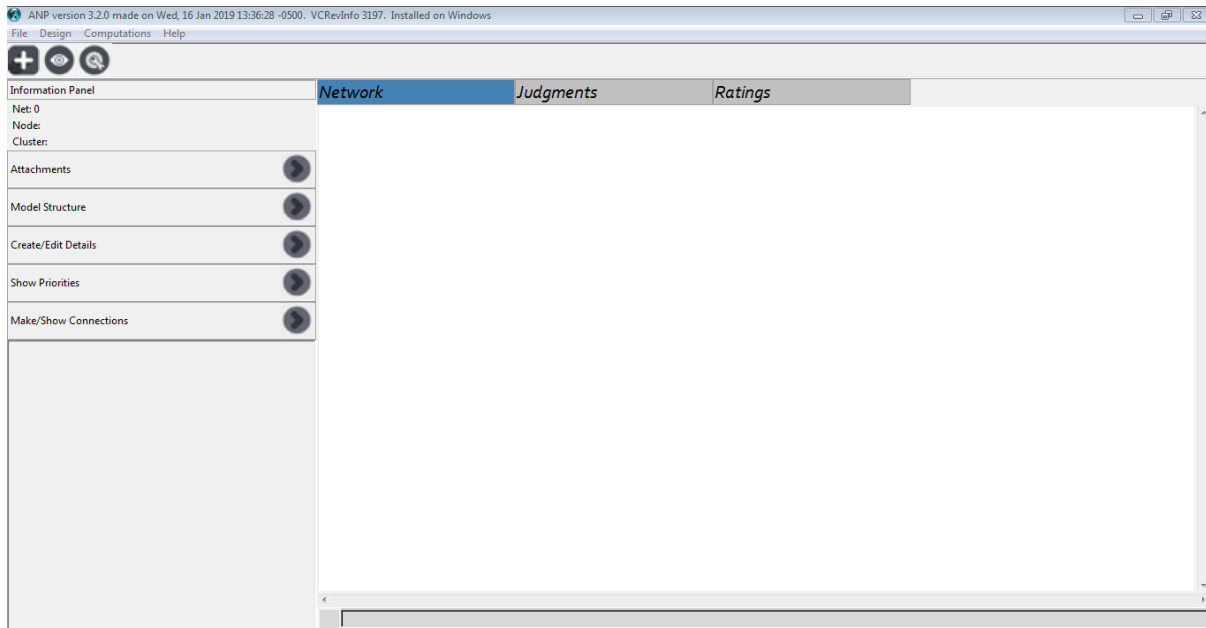


Figure 4.3: Interface d'accueil du logiciel SuperDecisions (Saaty T. L, et al., 2006)

➤ **Étape 2 : Création de la hiérarchie (objectif – critères – alternatives)**

Un nouveau projet est créé, puis la hiérarchie est construite en trois niveaux : objectif, critères et alternatives.

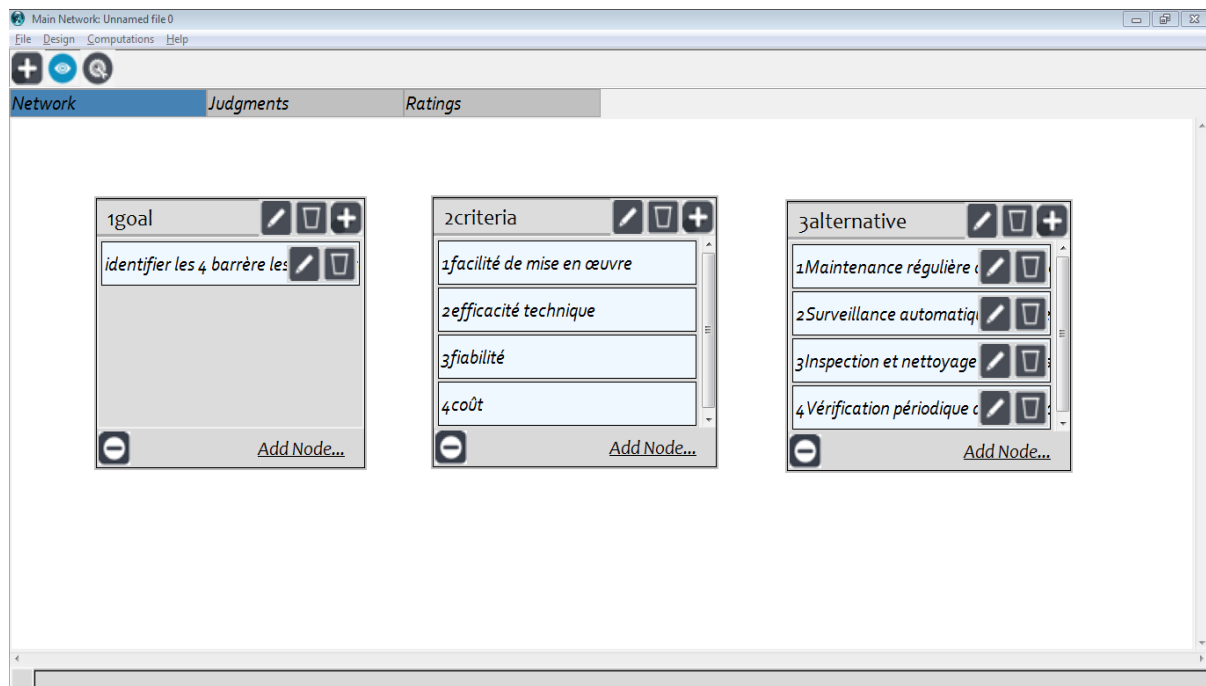


Figure 4.4 : Modélisation de la structure hiérarchique dans SuperDecisions (Saaty T. L, et al., 2006)

➤ **Étape 3 : Connection entre l'objectif et les critères**

Dans cette étape, chaque critère est relié directement à l'objectif afin de définir leur lien d'évaluation.

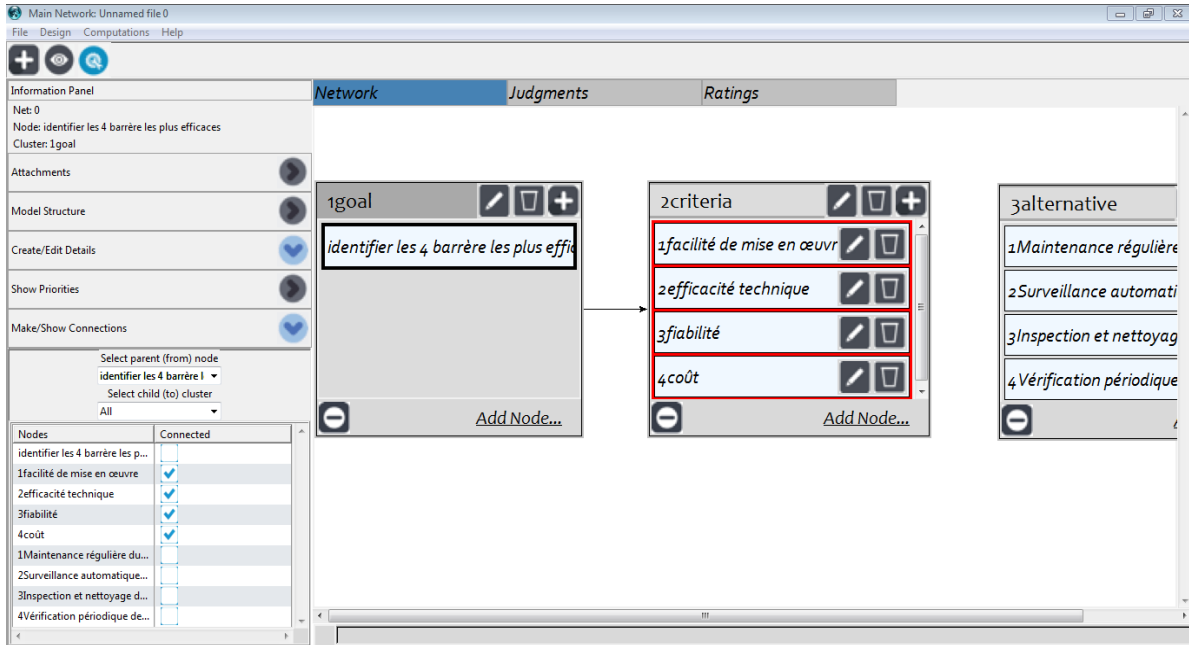


Figure 4.5: Liaison entre l'objectif et les critères dans l'arborescence (Saaty T. L, et al., 2006)

➤ **Étape 4 : Connection entre les critères et les alternatives**

Chaque critère est connecté aux 11 alternatives (barrière de prévention) afin de permettre leur évaluation selon chaque critère.

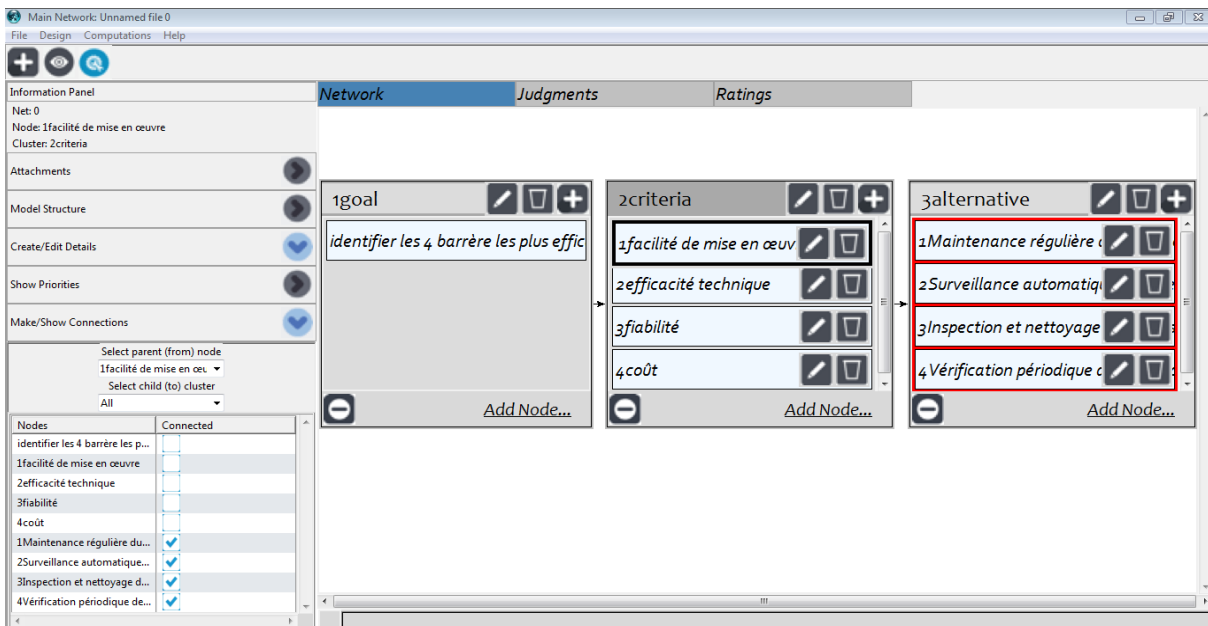


Figure 4.6: Liaison entre les critères et les barrières de prévention (Saaty T. L, et al., 2006)

➤ **Étape 5 : Saisie des jugements – Comparaison de l’objectif avec les critères**

Un tableau de jugements pair-à-pair est rempli pour comparer les critères entre eux par rapport à l’objectif.

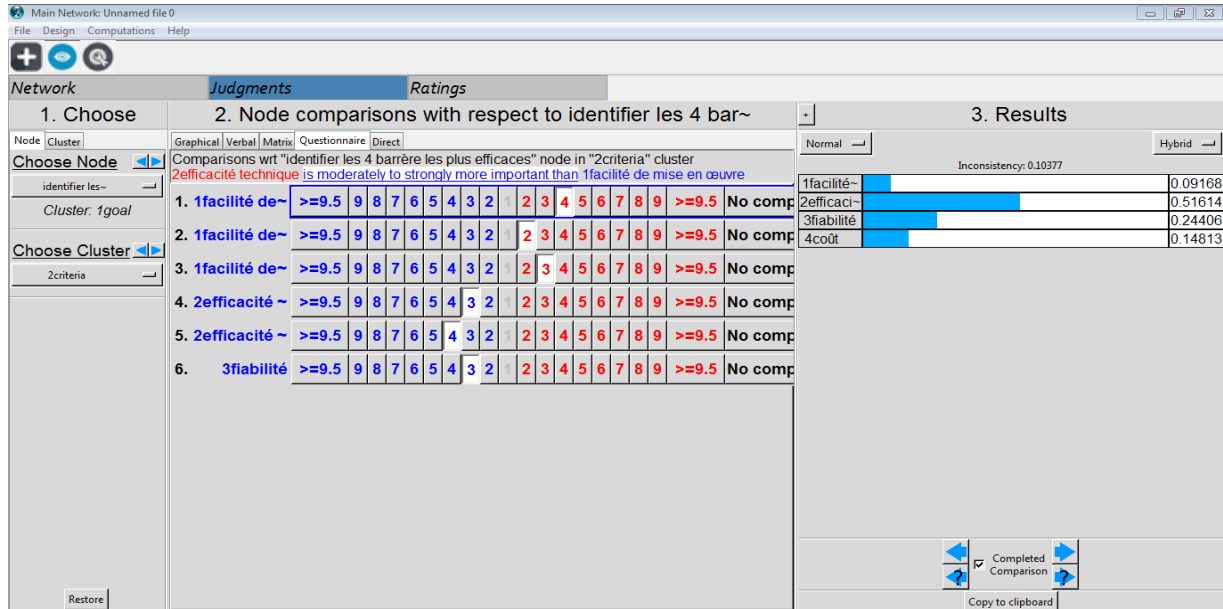


Figure 4.7: Matrice de jugements pair-à-pair entre l’objectif et les critères. (Saaty T. L, et al., 2006)

➤ **Étape 6 : Saisie des jugements – Comparaison des alternatives sous chaque critère**

Pour chaque critère, un tableau de jugements est rempli afin de comparer les 11 alternatives (barrière de prévention) deux à deux.

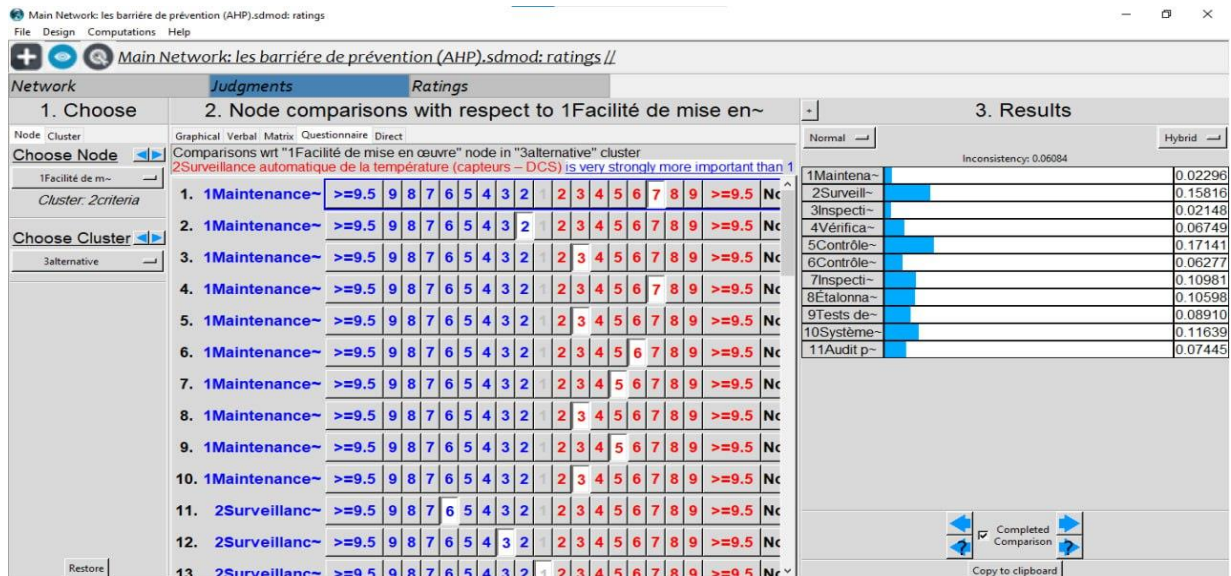


Figure 4.8: Matrice des jugements – Critère : Facilité de mise en œuvre (Saaty T. L, et al., 2006)

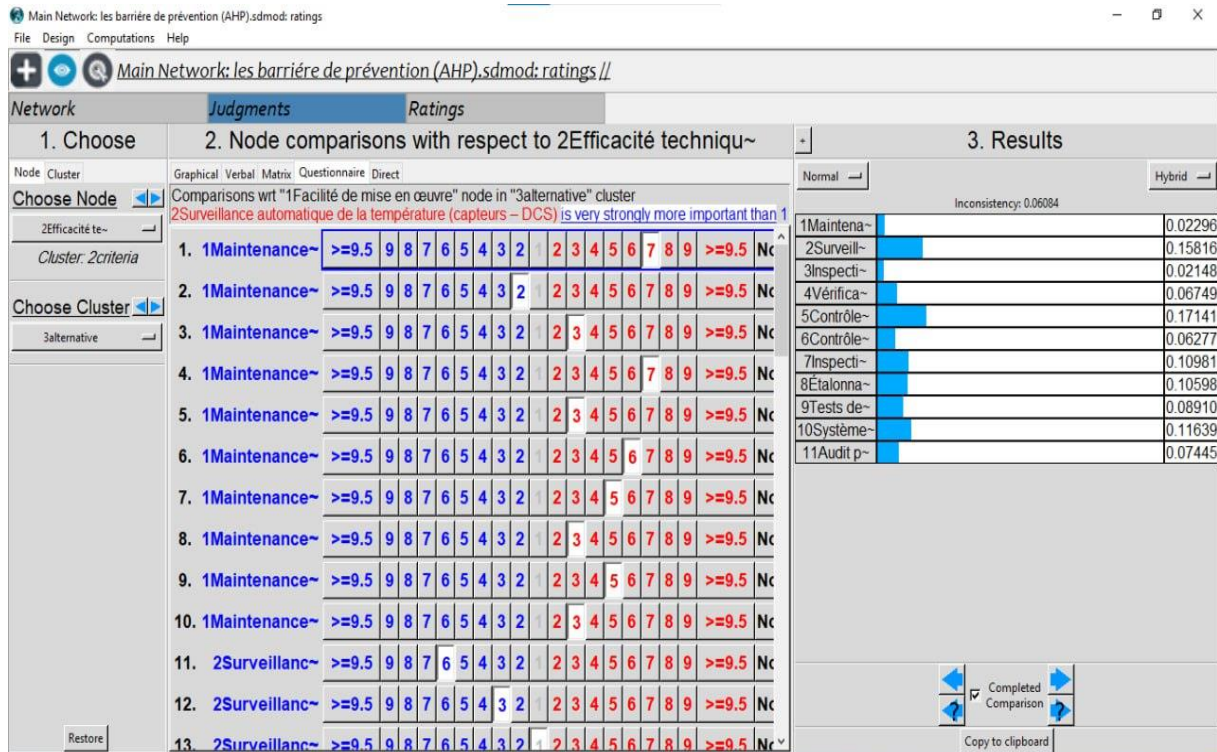


Figure 4.9: Matrice des jugements – Critère : Efficacité technique (Saaty T. L, et al., 2006)

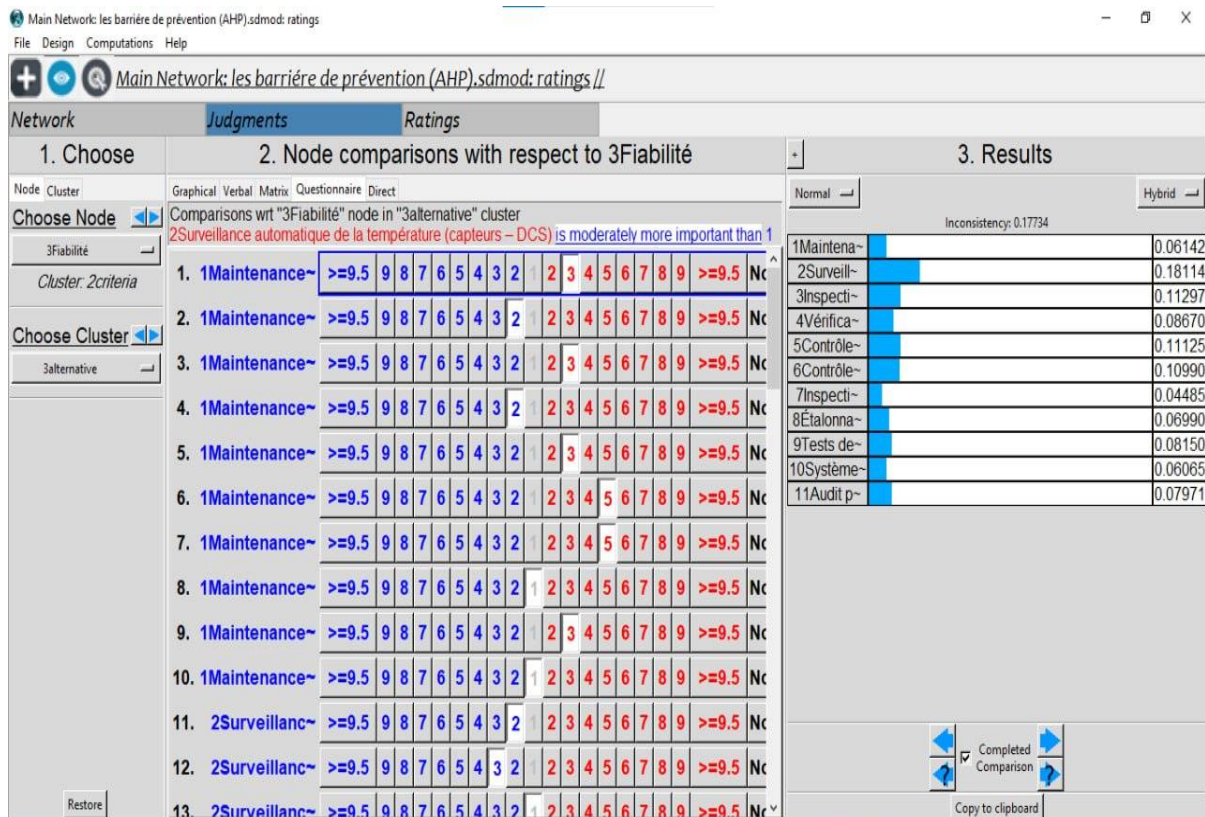


Figure 4.10 : Matrice des jugements – Critère : Fiabilité (Saaty T. L, et al., 2006).

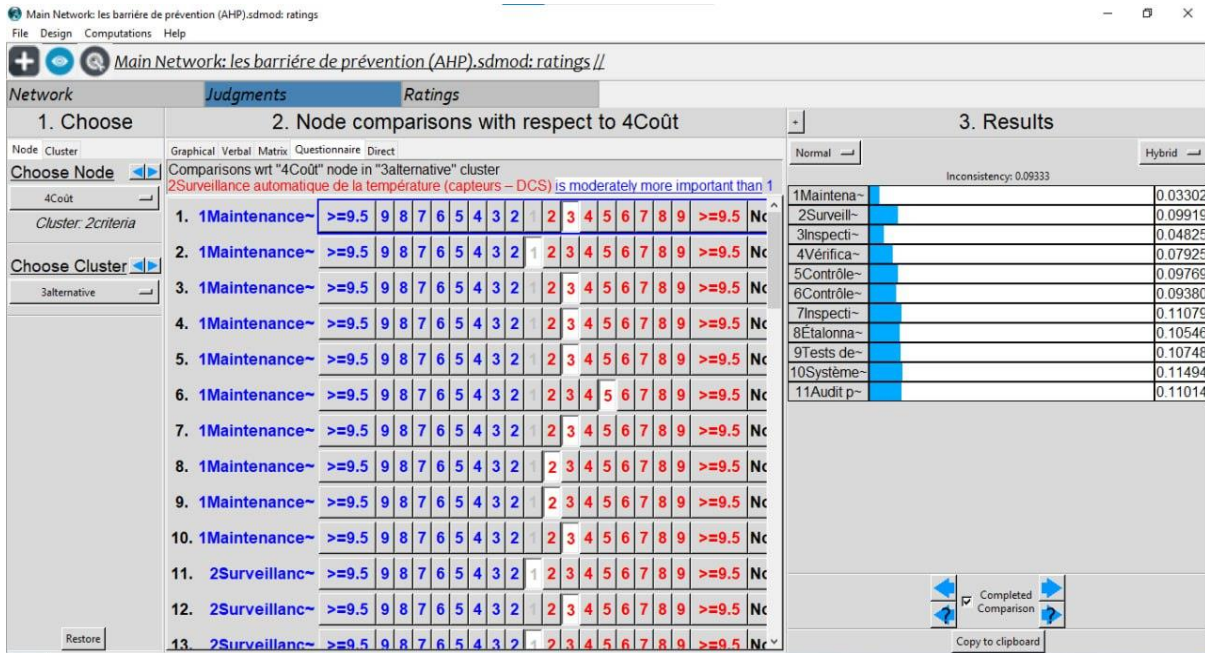


Figure 4.11: Matrice des jugements – Critère : Coût. (Saaty T. L, et al., 2006)

➤ **Étape 7 : Affichage des résultats finaux**

Une fois toutes les comparaisons effectuées, le logiciel affiche les résultats finaux, permettant d'observer le classement global des barrières de prévention.

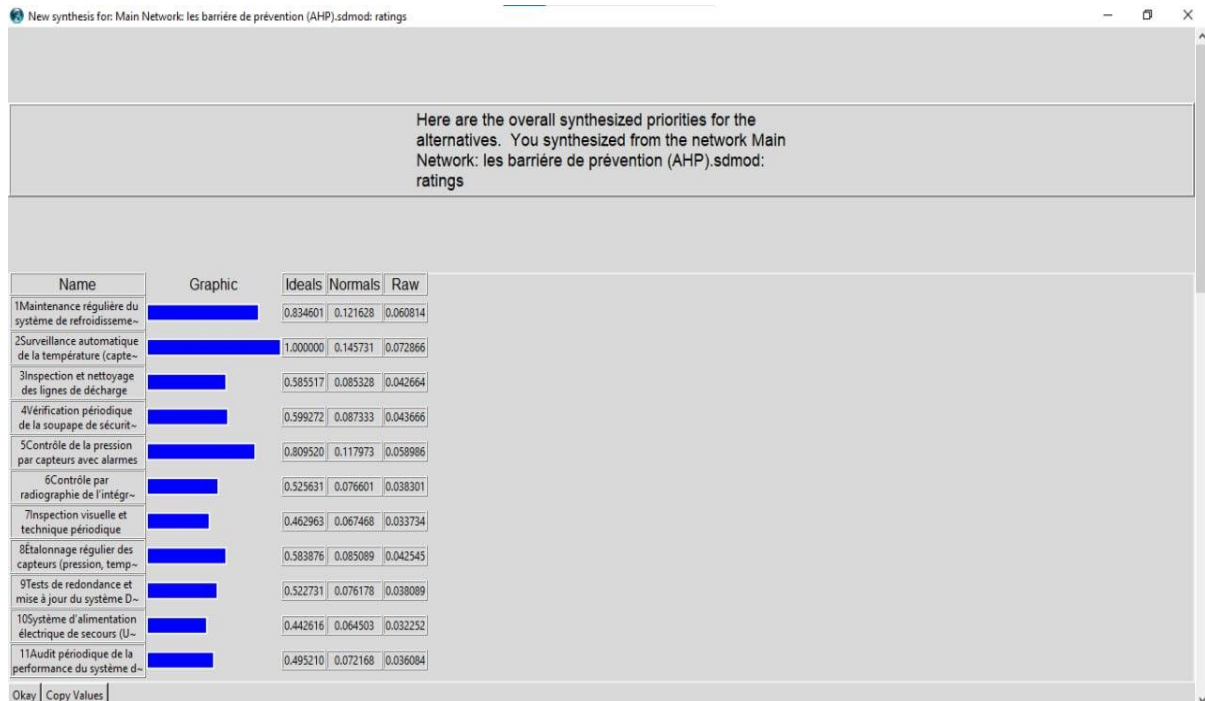


Figure 4.12: Résultats globaux de l'analyse AHP – Classement des barrières. (Saaty T. L, et al., 2006).

5.7. Hiérarchisation des barrières

Selon les priorités calculées à travers les critères AHP (fiabilité, efficacité technique, facilité de mise en œuvre, coût), les quatre premières barrières les mieux classées sont :

- ❖ Surveillance automatique de la température (capteurs – DCS)
- ❖ Maintenance régulière du système de refroidissement
- ❖ Contrôle de la pression par capteurs avec alarmes
- ❖ Vérification périodique de la soupape de sécurité (PSV)

6. Interprétation et plan d'action

6.1. Interprétation des résultats

L'application de la méthode AHP a permis de hiérarchiser les onze barrières de prévention identifiées dans l'analyse Bow-Tie du scénario de perte de confinement du réacteur 950-155.

Les résultats issus du logiciel SuperDecisions montrent que les barrières techniques liées à la surveillance automatisée et au contrôle des paramètres critiques obtiennent les poids globaux les plus élevés.

Cela souligne l'importance de la détection précoce, du suivi en temps réel et de la maîtrise des conditions opératoires pour anticiper et prévenir toute perte d'intégrité du système.

6.2. Plan d'action recommandé

Les résultats obtenus permettent de proposer un plan d'action structuré, réparti en mesures prioritaires et mesures complémentaires, visant à améliorer le niveau de prévention du scénario analysé.

6.2.1. Mesures prioritaires à mettre en œuvre

Les quatre barrières les plus performantes doivent faire l'objet d'une mise en œuvre immédiate ou d'un renforcement. Elles assurent un contrôle dynamique du fonctionnement du réacteur et permettent des réactions rapides en cas de dérives, limitant ainsi le risque de perte de confinement.

6.2.2. Mesures complémentaires à envisager

Pour renforcer davantage la robustesse du système, il est recommandé d'intégrer progressivement les barrières suivantes :

- ❖ Inspection et nettoyage des lignes de décharge
- ❖ Tests de redondance et mise à jour du système DCS
- ❖ Étalonnage régulier des capteurs (pression/température)

❖ Inspection visuelle et technique périodique

L'ajout de ces mesures permettrait d'instaurer une redondance fonctionnelle et d'augmenter la capacité de détection des anomalies, tout en assurant une prévention élargie face aux scénarios de défaillance potentiels.

Conclusion

Ce chapitre a permis d'appliquer concrètement les méthodes Bow-Tie et AHP sur le scénario de perte de confinement du réacteur 950-155 dans l'unité PEHD (CP2K Skikda). La méthode Bow-Tie a permis d'identifier les causes, conséquences et barrières associées à cet événement redouté, offrant une vision claire du système. La méthode AHP, via le logiciel SuperDecisions, a ensuite permis de classer les barrières de prévention selon des critères pertinents, aboutissant à la sélection des quatre plus efficaces. L'association de ces deux approches a facilité l'analyse structurée du risque et la prise de décision, tout en fournissant une base solide pour améliorer la sécurité et guider les actions futures dans un contexte industriel réel.

Conclusion générale

Ce travail s'inscrit dans le cadre de l'évaluation et de la gestion des risques industriels liés aux procédés de production du polyéthylène haute densité (PEHD) au sein de l'unité CP2K de Skikda. L'objectif principal de cette recherche était d'analyser un scénario critique – la perte de confinement du réacteur 950-155 – en combinant deux approches complémentaires : la méthode du Nœud Papillon (Bow-Tie) pour modéliser les scénarios d'accident, et la méthode AHP (Analytic Hierarchy Process) pour hiérarchiser les barrières de prévention selon des critères multicritères.

Dans un premier temps, nous avons présenté les fondements théoriques liés à la sécurité industrielle, aux risques majeurs, ainsi qu'aux principales méthodes d'analyse adoptées dans le domaine, notamment Bow-Tie et AHP. Cette base conceptuelle nous a permis de structurer l'étude de cas de manière rigoureuse, en appliquant les deux méthodes à un cas réel afin de mieux comprendre les mécanismes de risque et d'optimiser les choix de prévention.

L'application conjointe de ces deux méthodes nous a permis d'identifier les causes principales menant à la perte de confinement, de recenser les conséquences redoutées, puis de proposer et d'évaluer les barrières de sécurité correspondantes. Les résultats ont révélé que les barrières techniques associées à la surveillance automatisée et au contrôle des paramètres critiques du réacteur sont considérées comme les plus efficaces et fiables. Ces résultats confirment l'hypothèse de départ, selon laquelle la combinaison de Bow-Tie et AHP améliore la pertinence de l'analyse des risques et facilite une prise de décision structurée et adaptée au contexte industriel.

Les apports de cette étude se situent à plusieurs niveaux. Pour l'entreprise, elle fournit une méthode claire pour prioriser les actions de prévention. Pour la recherche, elle montre la complémentarité entre des approches qualitatives et quantitatives dans l'analyse des risques industriels. Toutefois, certaines limites doivent être signalées, notamment la dépendance aux données disponibles et la subjectivité dans les comparaisons par paires lors de l'utilisation de la méthode AHP.

Nous avons également rencontré certaines difficultés durant cette recherche, en particulier le manque d'accès à des données opérationnelles précises sur les performances réelles des barrières, ainsi que la complexité dans la modélisation du scénario de perte de confinement selon des standards industriels stricts.

En termes de perspectives, il serait pertinent de poursuivre cette démarche en élargissant l'analyse aux barrières de mitigation identifiées dans le scénario étudié. Une hiérarchisation de ces barrières selon les mêmes critères d'évaluation permettrait une vision plus globale et intégrée de la gestion des risques, couvrant l'ensemble de la chaîne causale et ses impacts

Conclusion générale

potentiels. De plus, l'intégration d'autres méthodes multicritères ou probabilistes pourrait également enrichir l'évaluation future des mesures de sécurité.

Bibliography

- L. Saaty, thomas et G. Vargas, Luis. 2001.** Analytic Hierarchy Process and Expert Choice: Benefits and limitations. 2001.
- A. de Ruijter et F. Guldenmund . 2016.** The bowtie method: A review. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2016.03.001>. 2016.
- Abdi, Z, et al. 2016.** Application de la méthode Bow-tie pour améliorer la sécurité des patients. 2016.
- Achouri, N. 2009.** *Apport de la logique floue à l'analyse de criticité des risques industriels*. s.l. : Université El-Hadj Lakhdar - Batna, 2009.
- Akintoye, A, Beck, M et Hardcastle, C. 2003.** *Public-Private Partnerships: Managing risk and opportunities*. 2003.
- B.DEBRAY, et al. 2006.** *Formalisation du savoir et des outils dans le domaine des risques majeurs (DRA-35), Méthodes d'analyse des risques générés par une installation industrielle*. 2006.
- Bitrix24. 2024.** Matrice des risques : définition, avantages et exemples gratuits. *Bitrix24*. [En ligne] 2024. <https://www.bitrix24.fr/articles/comment-realiser-une-matrice-des-risques-pour-votre-entreprise.php>.
- Boukhrissi, M. 2015.** *AMDEC (Analyse des Modes de Défaillances, de leurs Effets et de leur Criticité) appliquée à la STEP d'Ain El Houtz*. 2015.
- Bourareche, M. 2009.** *Apport des techniques floues et possibilistes à l'analyse semi-quantitative des risques industriels*. s.l. : l'Université EL Hadj Lakhdar Batna., 2009.
- CCPS. 2008.** *Guidelines for Hazard Evaluation Procedures (3e édition)*. 2008.
- Cox, Louis Anthony. 2008.** *Risk Analysis. What's Wrong with Risk Matrices*. 2008.
- CRAIM. s.d.** les barrières de sécurité et le noud papillon. *CRAIM* . [En ligne] s.d. <https://www.craim.ca/>.
- Debray, B, et al. 2011.** *Méthode d'analyse des risques générés par une installation industrielle*. 2011.
- Deprez, Marc . 2022.** Analyser l'aléa, le risque et la vulnérabilité. 2022.
- DOULDJAMEL, Nadia. 2016.** *Processus d'identification des dangers et gestion des risques avec une présentation de la méthode BowTie*. s.l. : UNIVERSITE SAAD DAHLEB -BLIDA 1-, 2016.
- GUIDE DLI. 2008.** *GUIDE DE MAITRISE DES RISQUES TECHNOLOGIQUES DANS LES DEPOTS DE LIQUIDES INFLAMMABLES* . 2008.
- Ian Travers et Paul McCulloch. 2018.** Using Bow Ties to Classify Barriers. *l'Institution of Chemical Engineers*. [En ligne] 2018. <https://www.thechemicalengineer.com/features/using-bow-ties-to-classify-barriers/>.
- IDDIR, Olivier. 2020.** Nœud papillon : une méthode de quantification du risque. *L'expertise technique et scientifique de référence*. [En ligne] 2020. <https://doi.org/10.51257/a-v2-se4055>.
- INERIS. 2014.** Analyse des risques. *INERIS*. [En ligne] 2014. <https://primarisk.ineris.fr>
- INERIS. 2006.** *Méthodes d'analyse des risques générés par une installation industrielle (DRA)*. 2006.
- INERIS. 2003.** *Outils d'analyse des risques générés par l'installation industrielle, direction des risques accidentels (DRA)*. 2003.
- INRS. 2020.** Culture de sécurité et prévention des risques : Concepts, enjeux et pratiques. 2020.
- ISO. 2018.** ISO 31000:2018 – Risk management – Guidelines. 2018.
- ISO. 2018.** ISO 45001:2018 – Systèmes de management de la santé et de la sécurité. 2018.
- Jean-Pierre, D, et al. 2017.** *Méthode d'analyse des risques*. 2017.
- kluwer, wolters. 2025.** The bowtie method. *wolters kluwer*. [En ligne] 2025. <https://www.wolterskluwer.com/en/solutions/enablon/bowtie/expert-insights/barrier-based-risk-management-knowledge-base/the-bowtie-method>.

- Kulakowski, Konrad. 2020.** *Understanding the Analytic Hierarchy Process*. 2020.
- L. Charlier et P. Rognon. 2004.** Risques naturels: origine, gestion, prévention. 2004.
- L. Saaty, Thomas. 1988.** *Decision Making for Leaders: The Analytic Hierarchy Process for Decisions in a Complex World*. 1988.
- Lévy, François et Chevalier, Alain . 2011.** *Prévention des risques professionnels : Principes et méthodes*. 2011.
- M. L. Pelling, D. J. High et A. E. Van Zyl. 2013.** The distinction between major and common risks in disaster management: A global perspective. 2013.
- Manuel opératoire. 2025.** Manuel opératoire de l'unité de production de polyéthylène haute densité. 2025.
- Pereyra-Rojas, Milagros et Enrique Mu. 2017.** *Practical Decision Making "An Introduction to the analytic hierarchy process using Super Decisions V2"*. 2017.
- PlasticsEurope. 2020.** Polyethylene (PE) – High Density (HDPE). 2020.
- Rivest, Robin. 2019.** *Techniques de simulation pour la recherche sur le perfectionnement de la méthode AHP*. 2019.
- Royer, Michel. 2009.** HAZOP : une méthode d'analyse des risques - Principe. *L'expertise technique et scientifique de référence*. [En ligne] 2009.
- Saaty T. L et Vargas L. G. 2006.** SuperDecisions V3.2. s.l. : Creative Decisions Foundation, 2006.
- Saaty, Thomas L. 2004.** La prise de décision – les processus hiérarchique analytique et de réseau (AHP/ANP). 2004.
- tavana, majid, soltanifar, mehdi et J.santos-arteaga, francisco. 2021.** analytical hierarchy process : revolution and evolution. *annals of operations research*. 2021.
- Union européenne. 2012.** Directive 2012/18/UE (Seveso III).
- Union européenne. 2012.** Directive 2012/18/UE du Parlement européen et du Conseil du 4 juillet 2012 relative à la maîtrise des dangers liés aux accidents majeurs impliquant des substances dangereuses. 2012.
- Unité CP2K. 2025.** Documents internes de l'unité CP2K – Informations techniques et organisationnelles. Skikda : s.n., 2025.
- Values Associates. 2025.** Gestion des risques : définition et principes fondamentaux. *Values Associates*. [En ligne] 2025. <https://www.values-associates.fr/blog/gestion-des-risques-definition-et-principes-fondamentaux/>.
- Visure Solutions. 2024.** Gestion des risques et AMDEC | Un guide complet. *Visure*. [En ligne] 2024. <https://visuresolutions.com/fr/guide-fmea-gestion-des-risques/processus-de-gestion-des-risques>.

Annexe

1. Présentation du logiciel SuperDecisions

Le logiciel SuperDecisions est un outil décisionnel puissant développé pour mettre en œuvre la méthode AHP (Analytic Hierarchy Process), une méthode multicritère d'aide à la décision élaborée par Thomas Saaty. Il permet de modéliser, structurer et analyser des problèmes complexes impliquant plusieurs critères souvent conflictuels.

2. Objectif du logiciel

L'objectif principal du logiciel SuperDecisions est de faciliter la prise de décision rationnelle dans des contextes où plusieurs alternatives doivent être comparées selon plusieurs critères. Il permet notamment :

- De hiérarchiser les critères et les alternatives.
- D'identifier les options les plus pertinentes.
- De vérifier la cohérence des jugements émis par les décideurs.

3. Fonctionnement général

Le fonctionnement du logiciel repose sur les étapes suivantes :

3.1. Modélisation hiérarchique du problème :

- Définition de l'objectif général (au sommet de la hiérarchie).
- Décomposition en critères et sous-critères.
- Intégration des alternatives à évaluer.

3.2. Comparaisons par paires

L'utilisateur effectue des comparaisons deux à deux entre les éléments (critères ou alternatives) en utilisant une échelle d'importance relative allant de 1 à 9 (échelle de Saaty).

Par exemple, si un critère A est fortement plus important que le critère B, on lui attribue une valeur de 7 dans la matrice de comparaison.

3.3. Calcul des poids et des priorités

Le logiciel calcule les poids relatifs de chaque élément à l'aide de méthodes mathématiques basées sur les valeurs propres (eigenvalues).

Il fournit également un indice de cohérence (CI) pour évaluer la fiabilité des jugements.

3.4. Synthèse et visualisation des résultats

Les résultats sont affichés sous forme de graphiques, tableaux ou modèles hiérarchiques pour

faciliter leur interprétation.

SuperDecisions propose aussi des analyses de sensibilité pour tester la robustesse des choix.

4. Avantages du logiciel

- Interface graphique intuitive.
- Facilité de saisie des comparaisons.
- Possibilité de gérer des hiérarchies complexes.
- Vérification automatique de la cohérence.

Outil particulièrement adapté à l'évaluation de scénarios de risques ou à la sélection de mesures de prévention.

5. Application dans ce travail

Dans le cadre de ce mémoire, SuperDecisions a été utilisé pour appliquer la méthode AHP afin de hiérarchiser les barrières de prévention identifiées dans l'analyse Bow-Tie du scénario de perte de confinement du réacteur 950-155. Cela a permis d'attribuer des poids aux différentes barrières selon des critères multicritères (ex. efficacité, fiabilité, coût, facilité de mise en œuvre), contribuant ainsi à une meilleure priorisation des mesures de sécurité.

5.1. Illustration : Interface du logiciel SuperDecisions

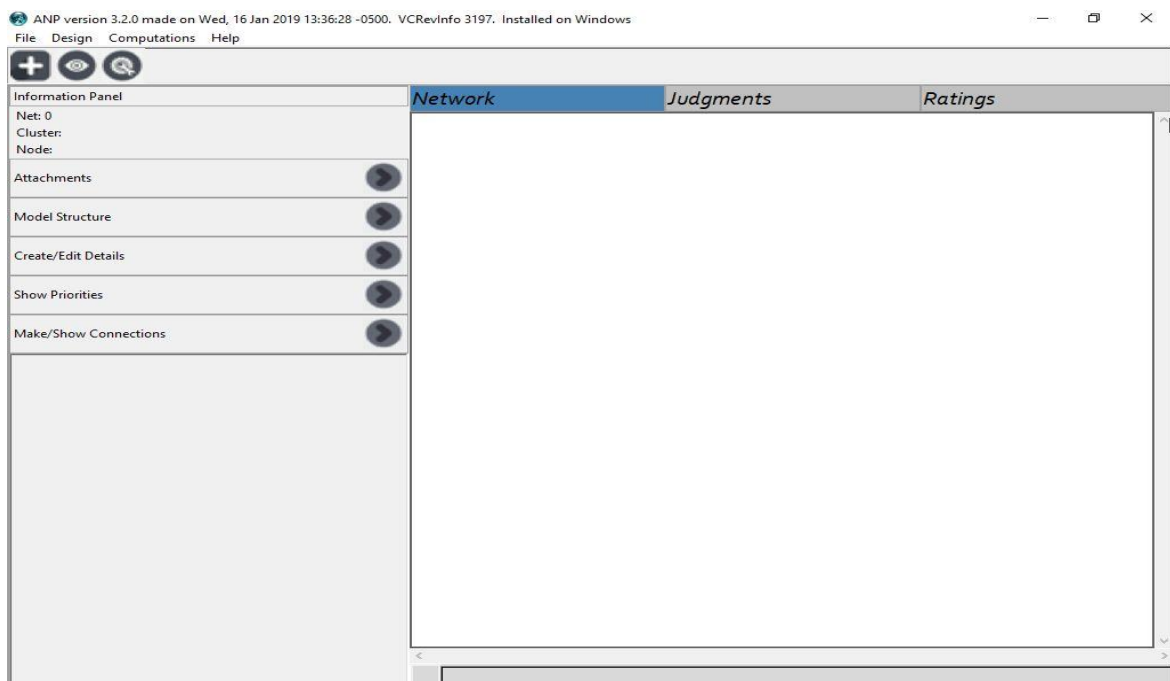


Figure 01 : l'interface du logiciel. (Saaty T. L, et al., 2006)

