



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche Scientifique

Université 20 Août 1955 – Skikda
Faculté de technologie
Département Génie des procédés
Réf : D012125001D

جامعة 20 أوت 1955 سكيكدة
كلية التكنولوجيا
قسم هندسة الطرائق

THÈSE

Présentée pour l'obtention du grade de

Doctorat 3^{ème} Cycle- LMD

En

Hygiène et Sécurité Industrielle

Option : Sécurité des procédés industriels et maîtrise des risques

Présenté par

BERRAH Fateh

**Apport de l'analyse coût-bénéfice dans la maîtrise des
risques majeurs en Algérie**

Soutenue publiquement le : 09/01/2025 devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Position	Université
M ^r Zennir Youcef	Professeur	Président	Université de Skikda
M ^r Innal Fares	Professeur	Rapporteur	Université de Skikda
M ^{me} Bahmed Lylia	Professeur	Examineur	Université de Batna 1
M ^r Bendib Riad	MCA	Examineur	Université de Skikda
M ^r Bouzaouit Azzedine	Professeur	Examineur	Université de Skikda

2024-2025



❖ *À mes chers parents*

❖ *À mes chers frères et sœurs*

❖ *À ma famille*

❖ *À mes collègues*

❖ *À ceux qui m'aiment*

❖ *À ceux que j'aime*

Remerciements

Alhamdulillah,

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

*Je désire mes profonds remerciements à mon encadreur Monsieur **INNAL Fares**, Professeur à l'Institut des Sciences et Technique Appliquées, Université de Skikda, pour tous ses précieux conseils, pour son aide, ses encouragements tout au long de ce travail.*

*J'adresse mes remerciements à monsieur **GOT Adel** maitre de conférences B à département intelligence artificielle, faculté informatique, Université Houari Boumediene Bab Ezzouar, pour son aide, son soutien, ses conseils et sa modestie*

*Je tiens à remercier monsieur **ZENNIR Youcef** Professeur à l'Institut des Sciences et Technique Appliquées, Université 20 Aout 1955 Skikda, de l'honneur qu'il m'a témoigné en acceptant de présider le jury de cette thèse.*

*J'exprime ma reconnaissance aux Messieurs **Riad Bendib**, Maitre de Conférences (A) à l'université de Skikda, et **Bouzaouit Azzedine**, Professeur à l'université de Skikda. Et Madame **Lilya Bahmed** Professeur à l'université Batna 01, pour avoir bien voulu me faire l'honneur d'examiner ce travail et de participer à ce jury.*

Un merci spécial à tout le personnel (enseignants et administrateurs) de la Faculté de technologie, département Génie des procédés et de l'Institut des Sciences et Techniques Appliquées-Skikda

Mes remerciements les plus profonds sont réservés aux personnes les plus importantes de ma vie : mes parents, mes frères et sœurs, et ma famille.

Enfin, je remercie, toutes les personnes qui m'ont encouragé et soutenu de près ou de loin durant mon parcours scientifique.

ملخص:

إن صناعة القرار فيما يخص السياسات الأمنية في المؤسسات والمصانع أمر مهم جدا بسبب العواقب المترتبة على الحوادث الصناعية والتي أصبحت كارثية بشكل متزايد : مخاطر كبرى. و لدعم هذه القرارات نجد العديد من الأدوات ومن بينها تحليل التكلفة والفائدة والتي أثبتت فعاليتها فيما يخص قياس ومقارنة التكلفة والمكاسب المتوقعة لقرار معين فهي تشجع فكرة لا إفراط ولا تفريط.

في هذا العمل تم تسليط الضوء على طريقة تحليل التكلفة والفائدة كطريقة فعالة لاختيار سياسة أمنية مناسبة في المؤسسات والصانع وتوضيح أهم عناصرها وطريقة استخدامها للوصول إلى القرار المناسب مع وضع نموذج عام لأهم التكاليف والفوائد المتعلقة بالاستثمارات الأمنية.

كما تم في هذا العمل تخصيص جزء مهم لتوضيح فكرة تصميم وتحسين أداء أنظمة السلامة المجهزة (SIS) باعتبارها من أهم الحواجز الأمنية في المنشآت الحالية حيث تم تطوير اطار جديد لتحليل فعالية التكلفة في اطار تصميم وتشغيل هذه الأنظمة وأيضا تصميم وتشغيل هذه الأنظمة في اطار تحليل التكلفة والفائدة وذلك بصياغة منقحة لمشكلة التحسين متعدد الأهداف وتطبيق الخوارزميات الجينية و خوارزمية MRFO.

وفي الجزء الأخير من هذا العمل تم توضيح فكرة اختيار النظام الأمني الأوتوماتيكي المناسب من بين مجموعة الحلول المتحصل عليها في عملية التحسين بالاعتماد على عملية التحليل الهرمي ومع الأخذ في الاعتبار الارتياح المتعلق بتصميم هذه الأنظمة. كما تم دمج عملية التحليل الهرمي و تحليل التكلفة والفائدة من اجل اختيار الحاجز الأمني المناسب باعتبار أن أنواع التكاليف والفوائد ذات أوزان مختلفة من الأهمية.

الكلمات المفتاحية :

تحليل التكلفة والفائدة، تحليل فعالية التكلفة، الحواجز الامنية، أنظمة السلامة المجهزة، التحسين متعدد الاهداف، عملية التحليل الهرمي، عدم اليقين.

Abstract:

Decision-making regarding safety policies in companies and factories are very important due to the consequences of industrial accidents, which have become increasingly catastrophic: major risks. To support these decisions, there are many tools, including cost-benefit analysis, which has proven effective in measuring and comparing the expected costs and benefits of a given decision. It encourages the idea of balance, avoiding both excess and deficiency.

This work highlights the cost-benefit analysis method as an effective tool for choosing appropriate safety measures. It explains its main components and usage for reaching an appropriate decision, with the development of a general model of costs and benefits related to safety investments.

A significant portion of this work is also dedicated to optimizing the design and performance of safety instrumented systems (SIS), considered as one of the most important safety barriers in current facilities. A newly developed framework for cost-effectiveness analysis in the context of designing and operating these systems is presented, as well as the design and operation of these systems within the framework of cost-benefit analysis, with a revised formulation of the multi-objective optimization problem and the application of genetic algorithms and the Manta Ray Foraging Optimization (MRFO).

Finally, the last part of this work explains how to choose the appropriate SIS from a set of solutions obtained during the optimization process, relying on hierarchical analysis and taking into account the uncertainty related to the design of these systems. Also, hierarchical analysis and cost-benefit analysis were combined to choose the appropriate safety barrier, taking into account that different types of costs and benefits have different weights in terms of importance.

Keywords:

Cost-benefit analysis, cost-effectiveness analysis, safety barriers, safety instrumented systems (SIS), multi-objective optimization, Analytic Hierarchy Process (AHP), uncertainty.

Résumé :

La prise de décision concernant les politiques de sécurité dans les entreprises et les usines est très importante en raison des conséquences des accidents industriels, qui sont devenues de plus en plus catastrophiques : risques majeurs. Pour soutenir ces décisions, il existe de nombreux outils, parmi lesquels l'analyse coût-bénéfice, qui a prouvé son efficacité pour mesurer et comparer les coûts et les gains attendus d'une décision donnée. Cela encourage l'idée d'équilibre, en évitant à la fois l'excès et l'insuffisance.

Ce travail met en lumière la méthode d'analyse coût-bénéfice en tant qu'outil efficace pour choisir une mesure de sécurité appropriée. Il explique ses principaux éléments et sa manière d'utilisation pour parvenir à une décision appropriée, avec l'élaboration d'un modèle général des coûts et des bénéfices liés aux investissements en sécurité.

Une partie importante de ce travail est également consacrée à l'optimisation de la conception et de la performance des systèmes instrumentés de sécurité (SIS), considérés comme l'une des barrières de sécurité les plus importantes dans les installations actuelles. Un cadre nouvellement développé pour l'analyse coût-efficacité dans le contexte de la conception et de l'exploitation de ces systèmes est présenté, ainsi que la conception et l'exploitation de ces systèmes dans le cadre de l'analyse coût-bénéfice, avec une formulation révisée du problème d'optimisation multi-objectifs et l'application des algorithmes génétiques et de l'optimisation par méthode Manta Ray Foraging Optimization (MRFO).

Enfin, la dernière partie de ce travail explique comment choisir le SIS approprié parmi un ensemble de solutions obtenues lors du processus d'optimisation, en s'appuyant sur l'analyse hiérarchique et en prenant en compte l'incertitude liée à la conception de ces systèmes. De plus, l'analyse hiérarchique et l'analyse coût-bénéfice ont été combinées pour choisir la barrière de sécurité appropriée, en tenant compte du fait que les différents types de coûts et de bénéfices ont des poids différents en termes d'importance.

Mots-clés :

Analyse coût-bénéfice, analyse coût-efficacité, barrières de sécurité, systèmes instrumentés de sécurité (SIS), optimisation multi-objectifs, processus d'analyse hiérarchique (AHP), l'incertitude.

Table des matières

Tables des matières

Dédicaces	I
Remerciements.....	II
ملخص.....	III
Abstract.....	IV
Résumé.....	V
Tables des matières.....	VI
Liste des figures	X
Liste des tableaux.....	XIII
Abréviations, Acronymes	XV
Introduction générale	1

Chapitre 01: Définitions et concepts fondamentaux

1.1. Introduction.....	7
1.2. Concepts et définitions.....	7
1.2.1. Notion de système	7
1.2.2. Notion de danger	8
1.2.3. Notion de risque	9
1.2.4. Le risque majeur.....	9
1.2.5. La sécurité et la sécurité fonctionnelle.....	11
1.3. L'accidentologie	12
1.4. La gestion des risques	15
1.4.1. L'analyse des risques	16
1.4.2. L'évaluation des risques.....	17
1.4.3. Traitement des risques.....	17
1.5. Les barrières de sécurité	18
1.6. L'optimisation.....	20
1.6.1. Concept et processus d'optimisation.....	20
1.6.2. Le problème d'optimisation	22

Table des matières

1.6.3. Les méthodes d'optimisation	23
1.6.3.1. Les méthodes déterministes.....	24
1.6.3.2. Les méthodes stochastiques.....	24
1.7. Conclusion	25
Références du chapitre 01	26

Chapitre 02: Méthodologie de l'analyse coût bénéfice

2.1 Introduction.....	30
2.2 Définition du projet d'investissement.....	30
2.3 Le cycle de vie d'un Projet	32
2.4 Le coût et la sécurité	33
2.5 Le principe ALARP	36
2.6 Approche en couches pour vérifier le principe ALARP	39
2.7 Analyse coût-bénéfice (ACB).....	40
2.7.1 Définition de l'analyse coût-bénéfice	41
2.7.2 Objectif de l'ACB	41
2.7.4 Les étapes de l'ACB.....	44
2.7.7 Indicateurs financiers (VAN, RAC).....	49
2.8 Notions liées à l'ACB	50
2.8.1 Taux d'actualisation	50
2.8.2 Horizon Temporel	52
2.8.3 Valeur statistique d'une vie (VSV)	52
2.9 Conclusion	54
Références du chapitre 02.....	55

Chapitre 03: Formulation mathématique des différents éléments liée à l'ACB

3.1 Introduction.....	60
3.2 Les coûts d'une barrière de sécurité	60
3.2.1 Estimation des coûts.....	61

Table des matières

3.2.2 Le modèle d'estimation des coûts	64
3.2.2.1 Le coût de construction(C_{Cons}).....	64
3.2.2.2 Le coût d'exploitation(C_{OP}).....	67
3.3 Les bénéfices d'une barrière de sécurité.....	71
3.3.1 Le coût d'accident.....	72
3.3.1.1 Modèle de Gavions et al.....	72
3.3.1.2 Modèle de Brijis et Reiners.....	73
3.3.2 Modèle d'estimation des bénéfices.....	74
3.3.2.1 Bénéfices directs.....	75
3.3.2.2 Bénéfices indirects.....	77
3.4 Facteur de disproportion (DF)	81
3.5 Rôle de l'ACB dans la répartition optimale du budget de sécurité.....	84
3.5 Conclusion	86
Références du chapitre 03.....	87

Chapitre 04: Optimisation de la conception des systèmes instrumentés de sécurité

4.1. Introduction.....	92
4.2. Généralités sur les systèmes instrumentés de sécurité.....	92
4.2.1. Niveau d'intégrité de sécurité	94
4.2.2. Modes de défaillances des systèmes instrumentés de sécurité.....	96
4.2.3. Formules généralisées relatives à la performance des systèmes instrumentés de sécurité	98
4.3. Analyse coût-efficacité de la conception des systèmes instrumentés de sécurité....	99
4.3.1. Utilisation des algorithmes génétiques pour résoudre le problème de conception	102
4.3.1.1. Présentation des algorithmes génétiques	102
4.3.1.2. Application des algorithmes génétiques.....	103
4.3.2. Utilisation de l'algorithme "Manta Ray Foraging optimization" pour résoudre le problème de conception	108

Table des matières

4.3.2.1. Inspiration et principe de l'algorithme	108
4.3.2.2. Application de l'algorithme "Manta Ray Foraging optimization"	111
4.4. Conception des systèmes instrumentés de sécurité dans le cadre d'analyse coût-bénéfice	115
4.5. Conclusion	121
Références du chapitre 04.....	122

Chapitre 05: Priorisation des barrières de sécurité

5.1. Introduction.....	126
5.2. Processus Analytique Hiérarchique	126
5.3. Théorie de base de l'AHP.....	129
5.4. Concept d'incertitude	131
5.5. Analyse d'incertitude et analyse de sensibilité	132
5.6. Gestion de l'incertitude dans les systèmes instrumentés de sécurité conformément à la norme CEI 61508 :.....	133
5.6.1. Route 1H (contraintes architecturales).....	133
5.6.2. Route 2H (Propagation de l'incertitude) :.....	134
5.7. Évaluation de l'incertitude par l'échantillonnage MONTE CARLO	134
5.8. Choisir le meilleur SIS selon la méthode AHP et le traitement d'incertitude	135
5.8.1. Cas 01 :non-prise en compte du traitement de l'incertitude	139
5.8.2. Cas 02 : prise en compte de l'incertitude.....	141
5.9. La sélection dans le cadre d'une analyse coûts-bénéfices et l'AHP	147
5.10. Conclusion:	153
Références du chapitre 05.....	154
Conclusion Générale:.....	158

Liste des figures

Liste des figures :

Chapitre 01

Figure 1.1: Attributs de mots système	8
Figure 1. 2: L'espace du risque	9
Figure 1. 3: Courbe de Farmer représente les trois domaines de risque	10
Figure 1. 4: Processus de gestion des risques	16
Figure 1. 5: Classification des barrières de sécurité	18
Figure 1. 6: Schéma illustratif des fonctions de sécurité	20
Figure 1.7: Processus d'optimisation	21
Figure 1.8: Classification des problèmes d'optimisation	23
Figure 1.9: Modelé de la boîte noire	23
Figure 1.10: Les méthodes déterministes les plus utilisées	24
Figure 1.11: Les méthodes stochastiques les plus utilisées	25

Chapitre 02

Figure 2.1: Processus de transformation par les projets d'investissement	32
Figure 2.2: Coûts typiques et niveaux de dotation tout au long du cycle de vie du projet.....	32
Figure 2.3: Relation entre les couts et le niveau de sécurité.....	33
Figure 2.4: Les relations entre la sécurité, l'économie et l'économie de la sécurité	35
Figure 2.5: Principe ALARP	37
Figure 2.6: Approche en couches pour la mise en œuvre de l'ALARP et du critère de disproportion.....	40
Figure 2. 7: Approche de l'ACB pour les investissements en matière de sécurité	45
Figure 2 8: Organigramme de l'approche ACB.....	46
Figure 2 9: Catégories des conséquences d'un projet.....	47
Figure 2 10: Actualisation des flux.....	51

Chapitre 03

Figure 3.1: Les catégories des coûts de cycle de vie	61
Figure 3.2: Composantes des coûts des mesures de sécurité	63
Figure 3.3: Comparaison entre deux situations : avec et sans mesure	74
Figure 3.4: Augmentation de DF avec le risque	82
Figure 3.5: Détermination du facteur de disproportion (DF)	83

Liste des figures

Figure 3.6: Processus répartition optimale du budget de la sécurité	84
Figure 3.7: Problème sac à dos	85

Chapitre 04

Figure 4.1: Relation de certaines normes et directives avec la CEI 61508	93
Figure 4.2: Cycle de vie de sécurité global	94
Figure 4.3: Les différents types de défaillance	96
Figure 4.4: Répartition des défaillances et de leurs taux.	97
Figure 4.5: Organigramme d'un algorithme génétique	103
Figure 4.6: Codage des solutions SIS (les chromosomes SIS).	104
Figure 4.7: Résultats de l'algorithme AG (Pareto optimal).	107
Figure 4.8: Poisson raie manta.	108
Figure 4.9: Stratégies de recherche de nourriture de la raie manta.	109
Figure 4.10: Résultats de l'algorithme MRFO (Pareto optimal).	114
Figure 4.11: Pareto optimal dans le cadre d'analyse coût-bénéfice	118
Figure 4.12: Nuage de points (Scatter plot) des objectifs obtenus	119
Figure 4.13: Le système instrumenté de sécurité n°13.	120

Chapitre 05

Figure 5.1: Une hiérarchie AHP simple.	127
Figure 5.2: Étapes du processus AHP	128
Figure 5.3: Cadre d'évaluation de l'incertitude	135
Figure 5.4: La méthodologie proposée	136
Figure 5.5: Hiérarchie pour la sélection d'une SIS	138
Figure 5.6: Pondération associée à chaque critère par rapport à l'objectif global	139
Figure 5.7: Pondérations des alternatives par rapport au critère PFD	140
Figure 5.8: Pondérations des alternatives par rapport au critère STR	140
Figure 5.9: Pondérations des alternatives par rapport au critère coût.	141
Figure 5.10: Classement général des alternatives	141
Figure 5.11: Changement des trois paramètres (PFD, STR et Coût) associés au SIS 01.	143
Figure 5.12: Fonction de distribution cumulative empirique pour les trois critères (PFD, STR et Coût).	144
Figure 5.13: Les pondérations des alternatives par rapport au critère PFD (valeur moyenne)	145

Liste des figures

Figure 5.14: Les pondérations des alternatives par rapport au critère STR (valeur moyenne)	145
Figure 5.15: Les pondérations des alternatives par rapport au critère coût (valeur moyenne)	145
Figure 5.16: Classement général des alternatives selon les valeurs moyennes	146
Figure 5.17: Classement général des alternatives selon les valeurs $X_{0.95}$	146
Figure 5.18: Hiérarchie pour la sélection d'une mesure de sécurité.	149
Figure 5.19: Comparaisons des sous critères (bénéfices) par paires par rapport à l'objectif global et aux pondérations associées.	150
Figure 5.20: Comparaisons des sous critères (coûts) par paires par rapport à l'objectif global et aux pondérations associées.	151
Figure 5.21: Histogramme représentant les résultats de l'équation 5.12.....	151

Liste des tableaux

Liste des tableaux :

Chapitre 01

Tableau 1.1: Exemples d'accidents industriels dans le monde .	13
Tableau 1.2: Les accidents industriels en Algérie .	14

Chapitre 02

Tableau 2.1: Exemple de classification des risques .	38
Tableau 2.2: Interprétation des classes de risques .	38
Tableau 2.3: Les étapes de l'ACB .	44
Tableau 2.4: Impact de l'actualisation sur les valeurs économiques du futur .	51
Tableau 2.5: Horizons temporels conseillés pour des projets dans différents secteurs..	52

Chapitre 03

Tableau 3.1: Catégories de coût des mesures de sécurité .	64
Tableau 3.2: Modèle de Gavions et al. .	73
Tableau 3.3: Modèle de Brijis et Reiners. .	74
Tableau 3.4: Éléments du problème répartition du budget de sécurité. .	85

Chapitre 04

Tableau 4.1: Niveaux d'intégrité de sécurité en fonction des mesures de défaillances.	96
Tableau 4.2: Les données d'entrée. .	101
Tableau 4.3: Quelques solutions du front de Pareto de l'algorithme AG.. .	106
Tableau 4.4: Quelques solutions du front de Pareto de l'algorithme MOMRFO. .	113
Tableau 4.5: Les avantages de l'élimination du risque d'explosion étudiés. .	115
Tableau 4.6: Quelques solutions du front de Pareto de l'algorithme MOMRFO dans le cadre de l'analyse coût-bénéfice .	117

Chapitre 05

Tableau 5. 1: Méthode de l'échelle de Saaty's pour les comparaisons par paires.	129
Tableau 5.2: Valeurs de l'indice aléatoire (RI). .	130
Tableau 5.3: SIL maximum admissible pour une fonction de sécurité réalisée par un sous-système de type A ou B .	133
Tableau 5.4: Quelques solutions de l'ensemble optimal de Pareto. .	137
Tableau 5.5: Matrice de décision normalisée. .	140
Tableau 5.6: Caractéristiques de fiabilité et de cycle de vie des éléments du SIS n01.	142

Liste des tableaux

Tableau 5.7: Résultats obtenus grâce à l'approche MC (SIS 01).	143
Tableau 5.8: Résultats obtenus grâce à l'approche MC liée aux sis proposé	144
Tableau 5.9: Matrice de décision normalisée selon les valeurs moyennes	145
Tableau 5.10: Coûts liés aux mesures de sécurité	150
Tableau 5.11: Bénéfices liés aux mesures de sécurité.....	150

Abréviations, Acronymes

Abréviations, Acronymes

- ACB** : Analyse coûts-bénéfices.
- ACE** : Analyse coût-efficacité.
- AHP** : Processus d'analyse hiérarchique.
- AG** : Algorithmes Génétiques.
- ALARP** : As Low As Reasonably Practicale (aussi bas que raisonnablement possible).
- DC** : Diagnostic Coverage (Couverture du Diagnostic).
- DCC** : Défaillance de Cause Commune.
- DF** : Disproportion factor (facteur de disproportion).
- E/E/EP** : Electrique / Electronique / Electronique Programmable.
- EN** : European Norm (Norme Européenne).
- ESD** : Emergency Shut Down (arrêt d'urgence).
- HSE** : Hygiène Sécurité Environnement.
- ICAF** : Coût implicite pour éviter un décès.
- IEC** : International Electrotechnical Commission.
- ISO** : International Organisation for Standardization.
- KooN** : K out of N (K parmi N).
- LCC** : Life cycle cost (coût de cycle de vie).
- MATLAB** : MATrixLABoratory.
- MDT**: Mean Down Time.
- MRFO** : Manta Ray Foraging Optimization.
- MTBF**: Mean Time Between Failure.
- MTTF**: Mean Time To (first) Failure.
- MTTR** : Mean Time To Repair (durée moyenne de réparation).
- MTTR_{SD}** : Durée moyenne de réparation d'une défaillance sûre (détectée).
- MUT** : Mean Up Time (durée moyenne de fonctionnement après réparation).
- OIT** : Organisation Internationale du travail.
- PFD** : Probability of Failure on Demand (probabilité de défaillance à la demande).
- PFH** : Probability of Failure per Hour (probabilité de défaillance par heure).
- PFS** : Probabilité de défaillance sûre (Intempestif).
- RAC** : Rapport bénéfices-coûts.
- RFF** : Risk Reduction Factor (facteur de réduction du risque).
- VAN** : Valeur actuelle nette.
- VSV** : Valeur statistique d'une vie.

Abréviations, Acronymes

SFF: Safe Failure Fraction (proportion des défaillances en sécurité).

SIF : Safety Instrumented Function (fonction instrumentée de sécurité).

SIL : Safety Integrity Level (niveau d'intégrité de sécurité).

SIS : Safety Instrumented System (Système Instrumenté de Sécurité).

STR : Le taux de défaillance sûr (Intempestif).

λ_T : Taux de défaillance aléatoire du matériel.

λ_S : Taux de défaillance aléatoire en sécurité du matériel.

λ_D : Taux de défaillance aléatoire dangereuse du matériel.

λ_{DD} : Taux de défaillance aléatoire dangereuse du matériel détectée.

λ_{DU} : Taux de défaillance aléatoire dangereuse du matériel non détectée.

λ_{SD} : Taux de défaillance aléatoire en sécurité du matériel détectée.

λ_{SU} : Taux de défaillance aléatoire en sécurité du matériel non détectée.

λ_x : Taux de défaillance x .

β_x : Fraction constante de taux de défaillance x .

λ_x^{ind} : Taux de défaillance indépendant x .

λ_x^{CCF} : Taux de défaillance de cause commune x .

Introduction Générale

Introduction générale

La sécurité industrielle est devenue un sujet d'intérêt majeur dans notre monde moderne en raison du développement technologique rapide. Elle occupe désormais une place centrale, tant en tant que concept qu'en tant que discipline scientifique essentielle, répondant aux besoins critiques de notre société contemporaine. Aujourd'hui, nous vivons à une époque marquée par les nouvelles technologies et des systèmes de production complexes, confrontant les entreprises à de nouveaux défis pour créer et maintenir un environnement de travail garantissant la performance de l'entreprise.

Le concept de sécurité industrielle remonte à l'Antiquité, comme en témoigne l'attention portée par les anciens Égyptiens à la sécurité des travailleurs dans les ateliers de construction. Cependant, il a véritablement pris forme au XVIII^e siècle, avec le début de la révolution industrielle, marquant le début d'une transformation radicale du monde industriel. Cette transformation a créé des environnements de travail dangereux, caractérisés par des conditions et des installations à risque, entraînant de nombreux accidents industriels et catastrophes, comme celles de Seveso, Bhopal et Piper Alpha.

Chaque année, le monde subit d'importantes pertes dues aux accidents du travail et aux maladies professionnelles, représentant un lourd fardeau pour les entreprises, avec des répercussions majeures sur l'économie mondiale. Selon le rapport de l'organisation internationale du travail (2019) [1], plus de 2,78 millions de décès sont recensés chaque année à cause des accidents du travail ou des maladies professionnelles. De plus, environ 374 millions d'accidents du travail non mortels se produisent annuellement (entraînant une absence du travail de plus de 4 jours). Les mauvaises pratiques en matière de santé et de sécurité au travail ont coûté près de 4 % du produit intérieur brut mondial, en raison des jours de travail perdus.

L'Algérie, à l'instar du reste du monde, a également été affectée par ces accidents, enregistrant plus de 44 milliards de dinars de pertes en 2006/2007 dues aux accidents du travail et aux maladies professionnelles [2].

Les conséquences des accidents survenant dans les installations industrielles modernes sont de plus en plus catastrophiques, notamment en ce qui concerne les risques majeurs. Cet état de fait a incité les gouvernements à adopter des politiques rigoureuses, visant en priorité à réduire les risques à un niveau jugé tolérable et à les maintenir dans le temps. Cette réduction est souvent obtenue par l'interposition successive de plusieurs barrières de protection entre la source de danger, le procédé industriel et les cibles potentielles, telles que les personnes,

Introduction Générale

les biens et l'environnement. Ces barrières de sécurité doivent être conçues, installées et maintenues en fonction des scénarios d'accident qu'elles sont censées neutraliser.

Cependant, un usage excessif et non réfléchi de ces barrières pourrait entraîner des coûts d'acquisition et de maintenance trop élevés par rapport à leur utilité. C'est pourquoi les décideurs au sein des entreprises doivent faire des choix judicieux et éclairés pour assurer un développement sûr. Parmi les outils d'aide à la décision, l'analyse coût-bénéfice (ACB) s'est révélée être un moyen efficace de mesurer et de comparer les coûts et les gains attendus d'une décision donnée. Le principe "Aussi bas que raisonnablement possible" (ALARP) repose sur cette méthode pour guider les décisions relatives aux investissements en sécurité. Ce principe est largement adopté comme modèle de gestion de la sécurité dans de nombreuses industries, telles que l'industrie pétrolière, gazière et chimique.

L'analyse coût-bénéfice est un outil puissant permettant de déterminer objectivement les coûts et les bénéfices de chaque action [3]. Elle considère les barrières de sécurité proposées comme des investissements qui comportent des aspects positifs et négatifs. Les résultats négatifs correspondent aux coûts directs et indirects, tels que les coûts d'achat, d'entretien et d'inspection, tandis que les résultats positifs incluent les bénéfices directs et indirects, comme la prévention et la réduction des pertes humaines, la protection de l'environnement et la préservation de la réputation.

En intégrant l'ACB dans leurs processus de prise de décision, les entreprises peuvent optimiser l'allocation de leurs ressources en matière de sécurité industrielle. Cette méthode leur permet d'identifier les investissements les plus efficaces pour réduire les risques spécifiques auxquels elles sont confrontées. Cela peut inclure des investissements dans des systèmes de surveillance avancés, des mesures de prévention des accidents, des technologies de sécurité de pointe, ainsi que des programmes de formation du personnel.

On ne peut pas aborder l'analyse coût-bénéfice sans mentionner l'analyse coût-efficacité (ACE), qui en est un dérivé et qui diffère par son objectif. L'analyse coût-bénéfice vise à comparer les coûts totaux d'une action ou d'une décision avec les bénéfices totaux qu'elle procure, afin de déterminer si les avantages l'emportent sur les coûts. En revanche, l'ACE a pour but de déterminer la manière la plus économique d'atteindre un objectif spécifique, en minimisant les coûts. Elle permet de choisir la solution la plus rentable parmi différentes options ayant le même objectif. Cette méthode est souvent recommandée pour atteindre un niveau de risque tolérable, en particulier pour traiter les risques situés dans des zones à très haut risque.

Introduction Générale

Pour prévenir l'apparition d'événements indésirables et protéger les cibles à risque, il est nécessaire de mettre en place diverses mesures de sécurité à plusieurs niveaux. Parmi ces mesures, les systèmes automatiques jouent un rôle primordial dans la réduction des risques dans les installations modernes. Ces systèmes sont essentiels pour détecter les conditions anormales, telles qu'une pression excessive ou des fuites de gaz, et pour enclencher automatiquement des actions correctives, comme l'arrêt du processus. Cela permet d'éviter l'escalade des défaillances du processus vers des conséquences graves, avec peu ou pas d'intervention humaine.

L'importance des systèmes instrumentés de sécurité (SIS) pour garantir la sécurité est mise en évidence par des accidents tels que la catastrophe de Buncefield, principalement causée par la défaillance d'un système automatique de sur-remplissage. Cet événement illustre la nécessité d'un cadre rigoureux pour la conception et le bon fonctionnement des SIS, proportionnés au niveau de risque qu'ils doivent atténuer. Cette exigence a initialement conduit au développement de la norme générique de sécurité fonctionnelle CEI 61508 [4], qui a ensuite ouvert la voie à des normes sectorielles, comme la CEI 61511 [5] pour l'industrie de transformation. Ces normes définissent les exigences essentielles pour garantir la capacité des SIS à exécuter leurs fonctions de sécurité.

Ainsi, la conception de ces systèmes et l'amélioration de leurs performances sont d'une importance capitale en raison de leur rôle critique dans la réduction des risques. Ces améliorations reposent à la fois sur l'analyse coût-efficacité (ACE) et l'analyse coût-bénéfice (ACB), afin de s'assurer que les systèmes de sécurité sont non seulement efficaces, mais aussi optimisés économiquement.

La structure de cette thèse, qui a pour objectif principal de clarifier le rôle et l'importance de l'analyse coût-bénéfice en tant que méthode efficace pour la prise de décision dans la gestion des risques industriels, est la suivante :

- Le premier chapitre a pour but de présenter les définitions et concepts clés liées au sujet de recherche, en commençant par des notions de base telles que la définition du risque, du danger, de la sécurité et de la sécurité fonctionnelle. Il conduit ensuite au concept d'amélioration, ses types et les méthodes pour la résoudre, concept central de cette recherche.
- Le deuxième chapitre est consacré à l'explication de la méthode d'analyse coût-bénéfice (ACB), de ses avantages et de ses étapes. Il y est également question des termes et des facteurs les plus importants liés à cette méthode, afin de fournir un cadre expliquant son application aux investissements en sécurité. Ce chapitre inclut également une explication de

Introduction Générale

la relation entre sécurité et coût, du principe ALARP, ainsi qu'une analyse coût-efficacité (ACE), considérée comme une dérivation de l'ACB.

- Le troisième chapitre décrit et formule mathématiquement les éléments présentés dans le chapitre précédent. Il clarifie les coûts et bénéfices majeurs associés aux investissements en sécurité. Il propose un modèle des coûts du cycle de vie des barrières de sécurité, depuis la conception jusqu'au démontage, ainsi qu'un modèle expliquant les bénéfices résultant de ces barrières tout au long de leur cycle de vie. Le chapitre présente également l'application de l'ACB dans le domaine de la sécurité à travers un exemple basé sur le problème du sac à dos.

- Le quatrième chapitre se concentre sur le développement de l'idée de conception et d'exploitation des systèmes instrumentés de sécurité (SIS), étant donné qu'ils représentent les barrières de sécurité les plus importantes dans les entreprises actuelles. Deux idées principales sont abordées :

- ✓ La première est le développement d'un nouveau cadre d'analyse coût-efficacité pour la conception et l'exploitation des SIS, visant à atteindre un équilibre optimal entre l'intégrité de la sécurité, la sécurité opérationnelle et le coût du cycle de vie du SIS. Cette approche repose sur une formulation révisée du problème d'optimisation multi-objectifs, basée sur le modèle de coût du cycle de vie présenté dans le chapitre précédent, résolu à l'aide d'algorithmes génétiques et de la méthode Manta Ray Foraging Optimization (MRFO).
- ✓ La deuxième idée concerne la conception et l'exploitation des SIS dans le cadre de l'analyse coût-bénéfice (ACB), avec une formulation révisée du problème d'optimisation multi-objectifs, également résolu en utilisant la méthode MRFO.

- Le cinquième chapitre explique comment choisir le système instrumenté de sécurité (SIS) approprié en utilisant le processus hiérarchique analytique (AHP), tout en tenant compte de l'incertitude dans le processus d'optimisation. Il expose également la manière de sélectionner la barrière de sécurité appropriée dans une analyse coût-bénéfice, en appliquant l'AHP pour attribuer un poids à chaque type de coût et de bénéfice.

Enfin, la thèse se conclut par une synthèse générale des résultats principaux de cette recherche, ainsi que ses limites et les perspectives de recherche futures.

Références :

- [1] International Labour Organization (ILO). (2019). La sécurité et la santé au cœur de l'avenir du travail : Mettre à profit 100 ans d'expérience. International Labour Office. ISBN : 978-92-2-133154-4 tiré de www.ilo.org.
- [2] Ouddai, R. (2013). Étude des relations entre les coûts d'accidents et la performance en sécurité (Doctoral dissertation, Université de Batna 2).
- [3] Reniers, G., Talarico, L., & Paltrinieri, N. (2016). Cost-benefit analysis of safety measures. In Dynamic risk analysis in the chemical and petroleum industry (pp. 195-205). Butterworth-Heinemann.
- [4] IEC 61508 (2010), Functional Safety of Electrical/electronic/programmable Electronic Safety Related Systems, 2nd ed., IEC 61508 Standard, Geneva.
- [5] IEC 61511 (2016), Functional Safety – Safety Instrumented Systems for the Process Industry Sector, 2nd ed., International Standard, Geneva.

Chapitre01 :

Définitions et concepts fondamentaux

1.1. Introduction

Le grand développement que connaît le monde a entraîné de nombreux accidents qui ont causé des dommages aux personnes, aux biens et à l'environnement. Ces accidents peuvent rester dans la mémoire humaine pendant plusieurs générations en raison de l'ampleur de leurs conséquences. Les accidents majeurs ont obligé les industriels à développer des démarches générales de gestion des risques afin d'identifier les scénarios possibles et atteindre le niveau de sécurité souhaité. Un tel niveau est pratiquement atteint la plupart du temps grâce à l'utilisation de différentes mesures de natures différentes comme barrières qui bloquent les scénarios accidentels à différents stades de leur évolution.

Ce premier chapitre est dédié à la présentation des concepts de base dans ce contexte afin de créer un cadre clair d'où émergeront les différentes problématiques qui seront abordées tout au long du manuscrit. Cela comprend principalement, les accidents majeurs les plus importants que le monde a connus, les approches de gestion des risques, jusqu'aux processus d'optimisation et ses méthodes les plus utilisées.

1.2. Concepts et définitions

Dans cette section, des définitions de quelques concepts de base importants dans le domaine de la gestion des risques sont fournies en se référant essentiellement à de nombreuses normes et textes réglementaires.

1.2.1. Notion de système

Le terme système provient du mot latin *systema* et à son tour du grec *σύστημα* *systema* qui signifie "concept global composé de plusieurs parties ou membres" [1]. La notion "système" dans son acception moderne remonte au XVIII^e siècle [2]. On trouve plusieurs définitions qui ont été proposées dans ce cadre. Par exemple, celle proposée par Le Moigne, J. L [3] considère un système comme "*un objet doté de finalité qui, dans un environnement, exerce une activité et voit sa structure interne évoluer au fil du temps, sans qu'il perde pour tant son identité*". Selon cet auteur, un système peut être vu donc comme [4] :

- Quelque chose (n'importe quoi présumé identifiable),
- Qui fait quelque chose (activité, fonctionnement),
- Dans quelque chose (environnement),
- Pour quelque chose (finalité, projet),
- Par quelque chose (structure = support de l'activité),
- Et qui se transforme dans le temps (évolution).

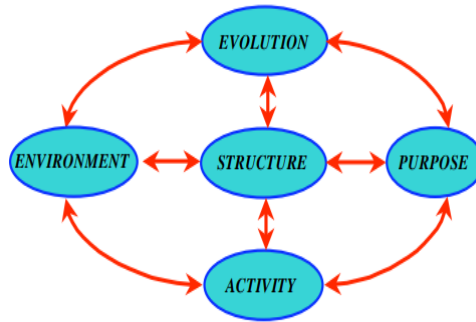


Figure 1.1: Attributs de mots système [4].

À travers les différentes définitions du mot système, nous constatons que les systèmes partagent souvent trois caractéristiques :

- *Structure* : les parties du système.
- *Comportement et objectif* : les étapes du travail du système pour atteindre l'objectif souhaité.
- *Interdépendance* : les différentes parties du système sont fonctionnellement et structurellement liées les unes aux autres.

1.2.2. Notion de danger

Il existe de nombreuses définitions de ce terme, par exemple selon Desroches [5] et la norme CEI 61508 [6] "*le danger désigne une nuisance potentielle pouvant porter atteinte aux biens (détérioration ou destruction), à l'environnement, ou aux personnes. Les dangers peuvent avoir une incidence directe sur les personnes, par des blessures physiques ou des troubles de la santé, ou indirecte, au travers de dégâts subis par les biens ou l'environnement*". De plus, il est défini par OHSAS 18001 [7] comme "*une source ou une situation pouvant nuire par blessure ou atteinte à la santé, dommage à la propriété et à l'environnement du lieu de travail ou une combinaison de ces éléments* ». On trouve aussi la définition proposée par la directive 96/82/CEI [8] qui le considère comme "*une propriété intrinsèque d'une substance dangereuse ou d'une situation physique de pouvoir provoquer des dommages pour la santé humaine et /ou l'environnement*".

Pour mieux présenter la nature du danger, on peut se référer au "modèle de référence", appelé "processus de danger" proposé par le groupe MADS qui se compose de quatre entités en interaction directement liées à la notion de système qui sont : le flux de danger, le système source de danger, le système cible et le champ de danger [4].

1.2.3. Notion de risque

Le risque selon Villemeur [9] "est une mesure d'un danger associant une mesure de l'occurrence d'un événement indésirable et une mesure de ses effets ou conséquences". Alors le risque est une mesure de la combinaison de deux facteurs qui sont la gravité des conséquences d'un danger et la fréquence de son occurrence. De plus, parmi les définitions les plus utilisées pour caractériser le sens du mot risque le considère comme "une combinaison de la probabilité d'occurrence d'un dommage et sa gravité" [8].

Le terme combinaison est généralement matérialisé par une opération de multiplication, ce qui nous permet la formulation suivante :

$$\text{Risque}(R) = \text{Probabilité (P)} \times \text{Gravité}(G) \quad (1.1)$$

La représentation graphique de cette relation est une droite ou une courbe décroissante en se basant sur la fonction $G = f(P)$. Elle dérive de la courbe dite de Farmer [10] et permet d'illustrer la partition de l'espace du risque en deux sous-ensembles disjoints, correspondant respectivement au domaine du risque acceptable et à celui du risque inacceptable comme le montre la Figure 1.2.

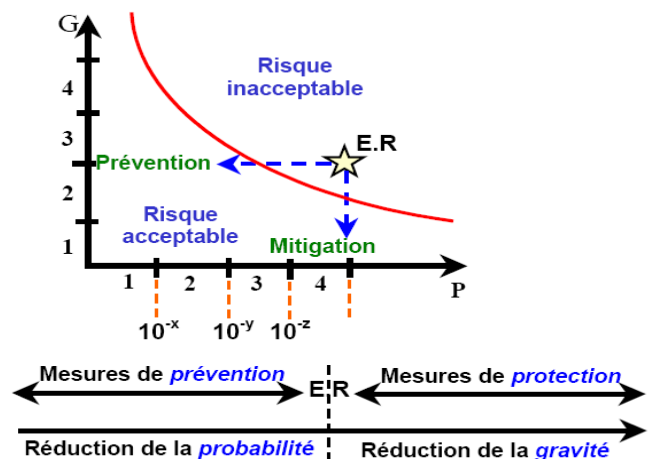


Figure 1. 2: L'espace du risque [4].

1.2.4. Le risque majeur

Le risque majeur est défini par [11] comme "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". En outre, d'après la loi 04/20 du 25/12/2004 [12], le risque majeur représente "toute menace probable pour l'homme et son environnement pouvant survenir du fait d'aléas naturels exceptionnels et/ou du fait d'activités humaines".

On dira qu'il s'agit d'un risque majeur lorsqu'il y a confrontation d'un "alea" (phénomène naturel ou technologique et d'intensité donnée : crue, affaissement de terrain, explosion dans une usine...) et d'un "enjeu" (personnes, biens, activités, moyens, patrimoine, ... susceptibles d'être affectés par un phénomène naturel ou technologique et de subir des préjudices ou des dommages).

Le risque majeur a deux caractéristiques essentielles :

- sa gravité, si lourde à supporter par les populations, voire les États
- sa fréquence, si faible qu'on pourrait être tenté de l'oublier et de ne pas se préparer à sa survenue.

La courbe de Farmer ci-dessous illustre bien le propos :

Domaine 1 : Forte probabilité et faible gravité (de nombreux accrochages).

Domaine 2 : Probabilité moyenne et gravité moyenne (de temps en temps des blessés).

Domaine 3 : Probabilité faible et gravité très importante (l'accident mortel), c'est la zone du risque majeur.

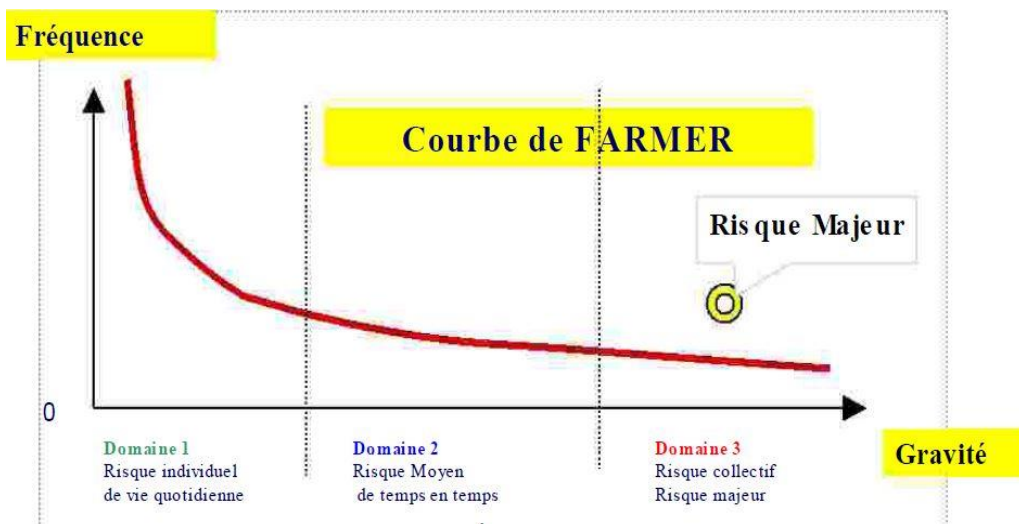


Figure 1. 3: Courbe de Farmer représente les trois domaines de risque [13].

On distingue généralement deux types d'accidents majeurs selon leur nature et leurs caractéristiques [14] :

- Les accidents majeurs naturels, appelés également catastrophes naturelles, dont l'origine se trouve dans les phénomènes géologiques et climatiques tels que les tremblements de terre, les éruptions volcaniques, les tempêtes, les cyclones, les raz de-marée et autres phénomènes similaires ;
- Les accidents majeurs technologiques ayant pour origine les activités et les ouvrages des hommes. Ce sont les accidents nucléaires, les ruptures de barrages, les explosions

dans les mines, les accidents de circulation dans les tunnels, les accidents des transports, ainsi que les accidents industriels.

Il y a deux réponses possibles à apporter en cas de catastrophe naturelle ou technologique : les réponses immédiates dites "d'après coup" et celles qui engagent une vraie réflexion à moyen et long terme et qui est spécifiquement nommée "prévention et gestion des risques" [4].

La loi N°04.20 (article 10) définit dix groupes de risques reconnus comme majeurs en Algérie [12] :

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

L'Algérie compte environ 4000 installations industrielles situées dans des zones urbaines très vulnérables [15]. *Il s'agit alors d'une question inquiétante qui nécessite un travail sérieux pour développer l'aspect sécuritaire.*

1.2.5. La sécurité et la sécurité fonctionnelle

La sécurité selon la définition de Larousse [16] est une "*situation dans laquelle quelqu'un, quelque chose n'est exposé à aucun danger, à aucun risque, en particulier d'agression physique, d'accidents, de vol, de détérioration*". Elle est généralement définie comme "*l'absence de risque inacceptable*" [8]. Selon Villemeur [9], la sécurité est "*l'aptitude d'une entité à éviter de faire apparaître, dans des conditions données, des événements critiques ou catastrophiques*".

Quant à la sécurité fonctionnelle, elle est considérée comme faisant partie de la sécurité globale, qui a émergé comme un concept en raison du rôle important des systèmes automatiques pour assurer la sécurité. Elle est définie par la norme CEI 61508 [6] comme "*un sous-ensemble de la sécurité globale se rapportant à l'EUC et au système de commande*".

de l'EUC qui dépend du fonctionnement correct des systèmes E/E/PE relatifs à la sécurité et des dispositifs externes de réduction de risque". De plus, la norme CEI 61511 [17] la définit comme "une partie de la sécurité globale relative au processus et au BPCS qui dépend du bon fonctionnement du système instrumenté de sécurité et des autres couches de protection".

1.3. L'accidentologie

Le développement des industries de transformation a contribué à accroître les stocks et l'utilisation de substances toxiques et inflammables et donc les risques d'accidents majeurs. L'accident est défini comme *"un événement imprévu et soudain, ayant entraîné des dégâts corporels et matériels. Les dégâts provoqués peuvent être plus ou moins importants, à caractère temporaire ou permanent »* [14]. L'analyse de l'accidentologie offre une multitude d'enseignements précieux pour renforcer l'analyse des risques. Elle apporte notamment des informations cruciales sur :

- La nature des événements susceptibles de déclencher des situations dangereuses ;
- L'efficacité des dispositifs de sécurité capables de prévenir, détecter ou maîtriser l'apparition d'un phénomène dangereux, ainsi que de minimiser ses impacts ;
- Les conséquences potentielles d'un événement redouté ;

Parmi les accidents majeurs les plus horribles dans ce contexte on peut citer par exemple la catastrophe de Seveso en Italie, où une fuite de gaz a entraîné la contamination de 1800 hectares et l'évacuation de 736 personnes. On trouve également la catastrophe de Bhopal en Inde, où une fuite de gaz toxique a fait plus de 2500 morts, plus de 10 000 blessés et l'évacuation de 200 000 personnes.

L'Algérie comme la plupart des pays du monde a également connue des accidents industriels majeurs, où elle a été exposée à une soixantaine d'accidents industriels et technologiques entre 2004 et 2020. L'exemple typique dans ce cadre est l'accident de Skikda, où une explosion dans une installation d'hydrocarbures a provoqué 27 morts et 74 blessés parmi les travailleurs. Des dommages enregistrés dans un rayon de 4 km.

Les deux tableaux suivants fournissent des informations générales sur quelques catastrophes industrielles aux niveaux mondial et national.

Tableau 1.1: Exemples d'accidents industriels dans le monde [18].

Date	Lieu	Nature	Conséquences
1966	Feyzin	Fuite-explosion (raffinerie)	18 morts, 84 blessées, des dommages enregistrés dans un rayon de 16 km.
1968	Rotterdam	Explosion (raffinerie)	2 morts, plus de 3000 blessées entre les travailleurs et les citoyens et des dommages enregistrés dans un rayon de 5 km.
1972	Mazingarde (Pas-de-Calais)	Explosion (usine chimique)	Des dégâts aux habitations jusqu'à 2 km.
1974	Flixborough	Fuite-explosion (usine chimique)	28 morts, 89 blessées, 3000 personnes évacuées et des dommages enregistrés dans un rayon de 13 km.
1976	Seveso	Fuite de gaz (usine chimique)	1800 ha contaminés, 736 personnes évacuées, grandes incertitudes sur les conséquences du poison et l'étendue des risques.
1978	Los Alfaque	Explosion (transport du gaz liquéfié)	216 morts et 200 blessées (accident près d'un camping).
1984	Bhopal	Fuite de gaz toxique (usine chimique)	Plus de 2500 morts, plus 10 000 blessés et 200 000 personnes évacuées.
1987	Tchernobyl	Explosion d'un réacteur Nuage radioactif sur toute l'Europe Centrale nucléaire	135 000 personnes évacuées, 2800km ² de terrain condamnés, estimation de 40 000 décès pouvant se déclarer dans les prochaines décennies.
2000	Enschede	Explosion d'un dépôt de feux d'artifices	22 morts, 13 disparus et plus de 1000 blessés, des dommages graves enregistrés dans un rayon de 750 km. Des estimations des dégâts de plus de 500 millions d'Euro.

2001	Toulouse	Explosion dans un entrepôt d'une matière dangereuse.	30 morts parmi les travailleurs, 1170 hospitalisés, 90 blessés graves des habitants avoisinants, plusieurs kilomètres des dommages considérables.
2004	Ghislenghien	Explosion d'un gazoduc	27 morts et des dégâts matériels considérables.
2005	Jilin	Explosion (usine chimique)	Des morts et des dégâts matériels.

Tableau 1.2: Les accidents industriels en Algérie [19,20].

Date	Lieu	Nature	Conséquences
1994	Ammoniac-Oran	Fuite de NH ₃	1 décès et 32 asphyxiés.
1998	Gazdouc-Skikda	Explosion d'un gazdouc	7 décès, 44 blessés, 10 habitations détruites et 50 habitations endommagées.
1998	ENCG-Bejaia	Incendie	2 décès, 3 ateliers endommagés.
2003	Ammoniac-Oran	Explosion d'un filtre à air	1 décès et 2 blessées.
2004	GNL-Skikda	Incendie-Explosion	27 décès et 74 blessés parmi les travailleurs. Des dommages enregistrés dans un rayon de 4 km.
2005	RTE-Skikda	Incendie d'un bac de pétrole brut.	2 morts, 6 personnes brûlées et 2 bacs endommagés.
2006	Mascara	Explosion (canalisation gaz)	54 blessés et 25 habitations endommagées.
2008	Gazdouc-Relizane	Explosion (canalisation gaz)	9 blessés.
2008	Gazdouc-Relizane	Explosion (canalisation gaz)	21 blessés.
2016	Naftal-Skikda	Incendie-Explosion	4 blessés et des dégâts matériels importants.
2017	Oued Smar	Incendie	3 blessés et d'importants dégâts matériels.

2018	Gazdoubentalha	Explosion	2 morts et 1 blessé.
2020	Naftal-Bordj Bou Arreridj	Incendie	3 blessés.
2020	El Oued	Fuites de pétrole	Pollution environnementale importante.

1.4. La gestion des risques

La gestion des risques est la base du succès des institutions et des entreprises et un élément indispensable à leur performance en fournissant un environnement approprié pour le travail et l'activité. Elle fait partie intégrante de la politique de l'entreprise et elle est l'un des principaux enjeux de toute activité industrielle afin de démontrer la mise en place des mesures nécessaires à la sécurité des personnes, des biens et de l'environnement. Alors quelle est la gestion des risques ?

Le mot "gestion" vient du mot latin "gestio" qui est défini comme l'action ou la manière de gérer, d'administrer et d'organiser quelque chose [16].

Selon le guide ISO/CEI 51 [8], la gestion des risques est définie comme "*l'ensemble des activités coordonnées, menées en revue de réduire le risque à un niveau jugé tolérable ou acceptable, à un moment donné et dans un contexte donné*". Elle est également définie par Pesqueux [21] comme "*un processus appliqué tout au long d'un programme et qui regroupe des activités d'identification, d'estimation et de maîtrise des risques où l'estimation est vue comme le processus utilisé pour affecter des valeurs à la probabilité, à la détectabilité et aux conséquences d'un risque*".

La figure suivante représente les différents étapes du processus de gestion des risques proposé par le guide ISO/CEI 51.

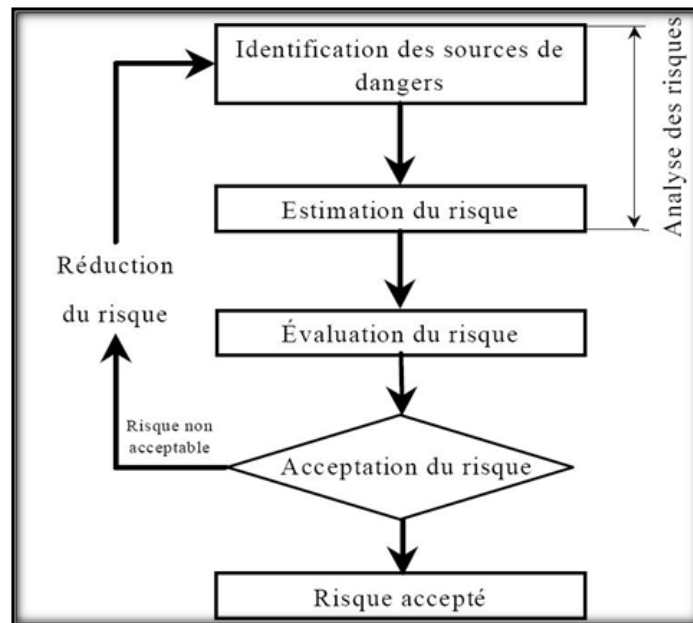


Figure 1. 4:Processus de gestion des risques [8]

La mise en œuvre de ce processus nécessite une équipe multidisciplinaire possédant une vaste expérience qui détermine la qualité et l'efficacité de l'approche de gestion des risques. Les principales étapes sont brièvement expliquées comme suit :

1.4.1. L'analyse des risques

L'analyse des risques est la première étape du processus de gestion des risques qui est définie par le guide ISO/CEI 51 [8] comme "*l'utilisation des informations disponibles pour identifier les phénomènes dangereux et estimer le risque*". Cette étape se compose de deux phases principales qui sont l'identification et l'estimation :

- ✓ *L'identification* : A cette phase, tous les risques du système à étudier sont identifiés de la manière la plus complète possible, cela se fait en déterminant les enchaînements des événements pouvant conduire à l'événement non souhaité en identifiant les causes et les effets du risque. Où l'on retrouve le modèle d'Analyse de Dysfonctionnement des Systèmes (MADS) qui illustre l'idée d'enchaînements et de transition de cause à effet [22]. Les étapes de la phase d'identification des risques sont différentes selon les méthodes. Toutefois, nous pouvons raisonnablement en identifier trois dont la réalisation nous paraît essentielle, à savoir : modéliser, collecter et inventorier [23].
- ✓ *L'estimation* : Le but de cette phase est de donner du poids à chaque scénario d'accident en déterminant les deux dimensions du risque : la probabilité (ou la fréquence) d'occurrence et les conséquences potentielles associées. Par exemple les

normes NF F 00-101(93) et NF F 71-011 (90), définissent cinq à six niveaux de probabilité d'occurrence d'un accident potentiel ou d'un événement dangereux. Pour l'échelle de mesure de gravité on trouve par exemple l'échelle internationale de gravité des événements nucléaires qui compte huit niveaux. Cette phase peut être combinée avec l'étape suivante (l'évaluation des risques).

1.4.2. L'évaluation des risques

Cette étape est destinée à classer les risques et les différencier selon les acceptabilités, au sens à comparer le niveau de risque estimé à celui jugé tolérable ou acceptable. Une fois la probabilité et la gravité sont estimées, elles sont reportées dans une matrice afin de déterminer l'acceptation du risque tel qu'il est ou de le réduire, et aussi conditionner l'ordre de priorité des actions de la phase de traitement des risques par la hiérarchisation des risques. Si les risques sont jugés acceptables, le processus sera terminé, sinon, le passage à l'étape suivante sera nécessaire. Quant aux critères d'acceptation des risques, ils résultent du consensus des différents partenaires dans la démarche de la gestion des risques en se basant sur les propositions des normes ou à l'aide d'une démarche comparative (comparer les risques acceptés dans les entités similaires).

1.4.3. Traitement des risques

Le traitement des risques est la dernière étape de la gestion des risques qui vise à réduire les risques inacceptables et aussi traiter les risques résiduels. La réduction des risques est obtenue de deux manières différentes. La première est la protection, qui représente l'ensemble des mesures visant à diminuer les conséquences d'un accident. Le deuxième est la prévention qui vise à réduire la probabilité d'occurrence, donc elle désigne les mesures à mettre en place pour empêcher la survenue d'un accident. Ces mesures sont estimées, dans certains cas, sur la base de la méthode d'analyse coûts-bénéfices comme méthode d'optimiser les investissements et de prendre des décisions sur les scénarios à traiter et les moyens retenus pour le traitement, ainsi que pour réaliser le principe "ALARP". Quant aux risques résiduels, malgré les mesures de sécurité prises, ils sont traités selon les choix du gestionnaire des risques que nous classons en deux familles : le transfert total ou partiel vers d'autres acteurs économiques ou la conservation par rétention partielle ou totale [23].

1.5. Les barrières de sécurité

Les barrières de sécurité (BS) ont été utilisées par l'homme depuis sa création pour le protéger lui et sa propriété. Leur utilisation a évolué avec le développement de la pensée humaine et l'émergence de l'industrie, ce qui a créé de nouveaux risques. Alors, que signifie le terme barrières de sécurité ?

Il n'existe pas une définition commune de ce concept dans les littératures et les recherches, et de nombreuses revues de littérature ont traité cette question, telles que [24-26]. On trouve également l'utilisation de nombreux termes qui portent une signification similaire tels que : couche de protection, mesures de sécurité, ... Mais généralement, les barrières de sécurité peuvent être définies comme "un outil (moyen) physique ou non physique prévu pour prévenir, contrôler ou atténuer les événements indésirables ou accidents" [24; 26]. Chaque barrière a une (des) fonction(s) qui représente l'objectif de la barrière qui est conçue pour prévenir, contrôler ou atténuer les événements indésirables ou les accidents [24], comme par exemple la fermeture d'une vanne pour couper l'alimentation en cas d'incendie par un système automatique.

Les barrières de sécurité sont classées selon deux critères principaux : la nature et le mode de fonctionnement (la fonction des barrières). D'après [24-27], les barrières de sécurité sont de trois types : techniques, humaines et mixte comme le montre la Figure 1.5.

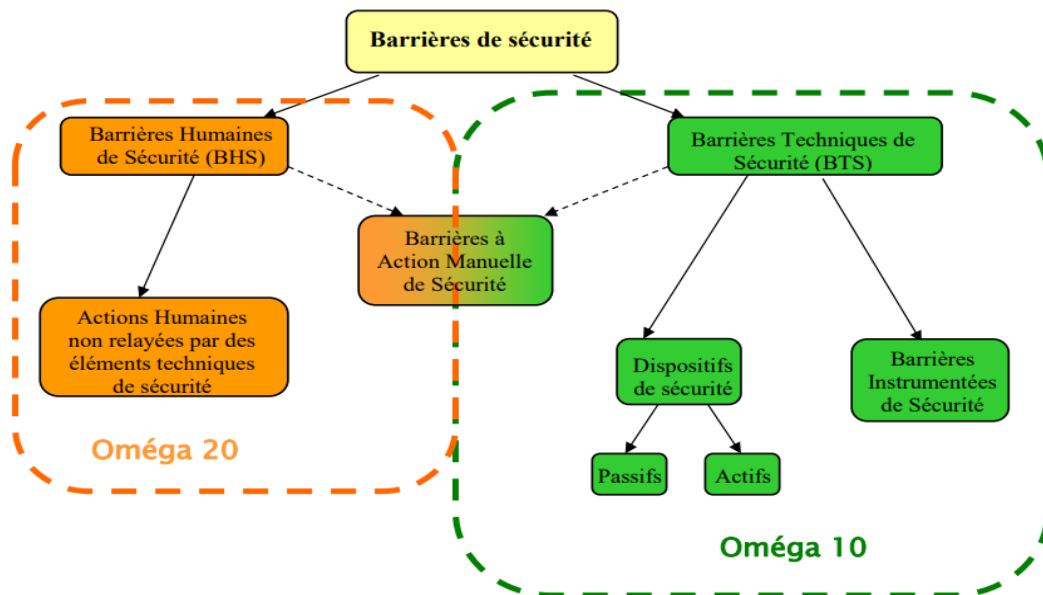


Figure 1. 5:Classification des barrières de sécurité [27].

La catégorie des barrières techniques de sécurité désigne les dispositifs de sécurité ou les barrières instrumentées de sécurité (BIS). Le dispositif de sécurité est généralement un élément unifié et indépendant qui assure la fonction de sécurité, et il est classé selon son besoin d'énergie d'activation pour remplir sa fonction de sécurité en deux catégories : passive (ex., murs coup de feu, cuvette de rétention) ou active (ex., soupape de sécurité). Pour les BIS, il s'agit de systèmes automatiques de sécurité qui feront l'objet de notre étude dans le Chapitre 4.

Les barrières humaines représentent toutes les procédures et les activités que les gens effectuent sans intervention technique pour assurer la maîtrise des paramètres de sécurité, comme par exemple la formation et la sensibilisation du personnel, les inspections périodiques, etc.

La dernière catégorie qui combine les barrières techniques et humaines est appelée barrières à action manuelle de sécurité ou barrières mixtes, comme par exemple la vanne manuelle d'isolement de la canalisation.

L'autre classement est basé sur la fonction des barrières de sécurité, où le projet ARAMIS [28] propose cinq classes décrites par des verbes : éviter, prévenir, détecter, contrôler et limiter comme le montre la Figure 1.6.

- ✓ Éviter : fonction vise à rendre un événement impossible généralement par des modifications profondes des installations.
- ✓ Prévenir : fonction vise à réduire la probabilité d'occurrence d'un événement.
- ✓ Détecter : fonction vise à détecter un événement, et c'est une fonction qui est liée à d'autres fonctions, comme contrôler ou limiter pour maîtriser l'accident.
- ✓ Contrôler : Cette fonction est destinée à remettre le système dans un état de fonctionnement sûr en maîtrisant le déroulement d'une dérive.
- ✓ Limiter : fonction vise à réduire les conséquences (gravité) d'un événement par exemple, limiter un temps de fuite ou un débit.

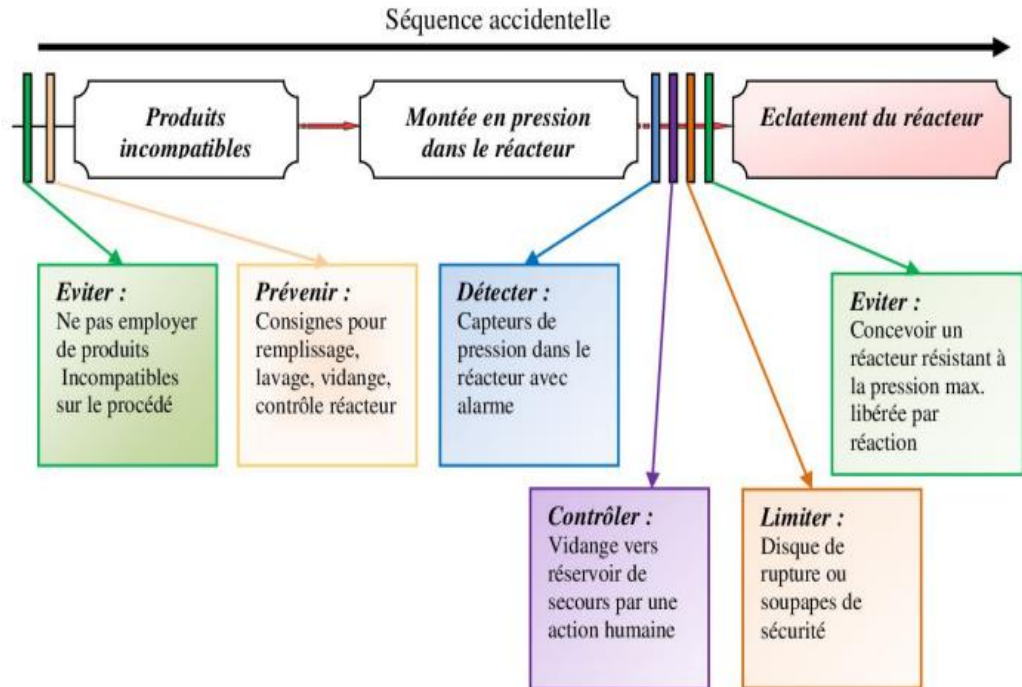


Figure 1. 6:Schéma illustratif des fonctions de sécurité [28].

1.6. L'optimisation

Dans cette section, nous mettrons en lumière le concept d'optimisation en tant qu'élément important du processus de prise de décision, en partant de la définition jusqu'au rappel des méthodes d'optimisation les plus utilisées.

1.6.1. Concept et processus d'optimisation

L'optimisation vient du le verbe "optimiser" ce qui signifie l'action d'obtenir le meilleur. En anglais, "optimization" est définie par le dictionnaire Cambridge [29] comme "*the process of making something as good as possible*" ce que veut dire en français "*le processus de rendre quelque chose aussi bon que possible*". D'après Euler "*il n'y a rien au monde qui ne se réalise sans la volonté de minimiser au maximiser quelque chose*". L'optimisation tourne alors autour de cette idée (le désir de la personne pour vouloir minimiser les pannes, les couts, ... ou maximiser les bénéfices...). Par exemple lorsqu'on pose la question "Quel est le meilleur chemin qu'on peut emprunter pour atteindre un endroit spécifique ?", le meilleur (l'optimum) ici signifie :

- Le chemin de plus court.
- Le chemin le plus rapide.
- Le chemin le moins chère.

La théorie et les méthodes d'optimisation sont une jeune matière en mathématiques appliquées, en mathématiques computationnelles et en recherche opérationnelle [28] cherchant à modéliser, à analyser et à résoudre analytiquement ou numériquement les problèmes qui consistent à minimiser ou maximiser une fonction sur un ensemble. Donc on peut dire que l'optimisation est le processus qui consiste à trouver la meilleure façon d'utiliser les ressources disponibles tout en ne violant aucune des contraintes imposées [31]. L'optimisation est fondamentale pour tout problème de prise de décision et joue un rôle important dans nombreux domaines comme la biologie, l'économie, le transport, l'ingénierie, etc.

L'optimisation est une étape essentielle de la prise de décision, qui commence lorsqu'une personne se sent inquiet d'un problème spécifique et essaie de transformer cette anxiété en un problème qui nécessite une solution et de rechercher certainement les meilleures solutions. La plupart des chercheurs divisent le processus de prise de décision en six étapes [32] :

- 1.** Identifier et clarifier le problème ;
- 2.** Définir le problème ;
- 3.** Formuler et construire un modèle mathématique ;
- 4.** Obtenir une solution au modèle ;
- 5.** Tester le modèle et évaluer la solution ;
- 6.** Implémentation et maintenance de la solution.

Les étapes 2, 3, 4 et 5 de prise de décision représentent le processus d'optimisation. Ce processus est divisé en trois étapes principales comme le montre la Figure 1.7 :

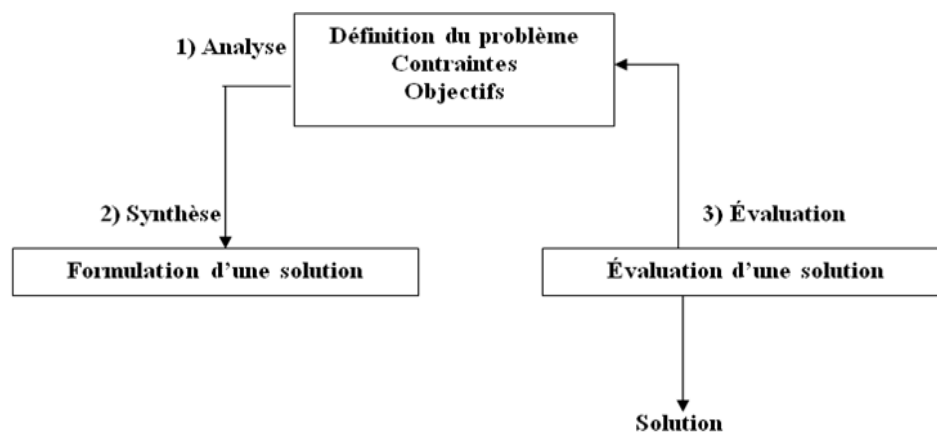


Figure 1.7:Processus d'optimisation [33].

Le processus d'optimisation vise premièrement à reconnaître l'existence d'un problème, déterminer sa taille et le définir avec précision (les limites, les hypothèses...), à élaborer un modèle mathématique et assurer que ce modèle fonctionne correctement, puis à appliquer les données pour dériver les solutions. Ensuite, il vise à évaluer les solutions afin de déterminer la force de la meilleure option et assurer que les décisions à qui en découlent fonctionneront comme prévu.

1.6.2. Le problème d'optimisation

Un problème d'optimisation est défini comme la recherche de la solution x^* parmi l'ensemble des solutions possibles S (espace de recherche). Cette solution donne le minimum ou le maximum d'une fonction "objectif" qui mesure la qualité de cette solution [34]. Le problème d'optimisation peut généralement être mathématiquement exprimé comme suite [32,35] :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Trouver } x \text{ pour :} \\ \text{Min / Max } f(x) \\ \text{Sujet à } g_i(x) < gb_i ; i=1, \dots, m. \quad (1.2) \\ \quad \quad \quad h_j(x) = hb_j ; j = 1, \dots, P. \end{array} \right.$$

Ou x est le vecteur des solutions, et chaque solution x_i est bornée par des bornes inférieures et supérieures $Li \leq x_i \leq Ui$, $g_i(x)$ représente les contraintes d'inégalité et $h_j(x)$ représente les contraintes d'égalité. Ce modèle peut varier selon le type de problème.

Les problèmes d'optimisation peuvent être classés selon plusieurs critères comme illustré dans la Figure 1.8.

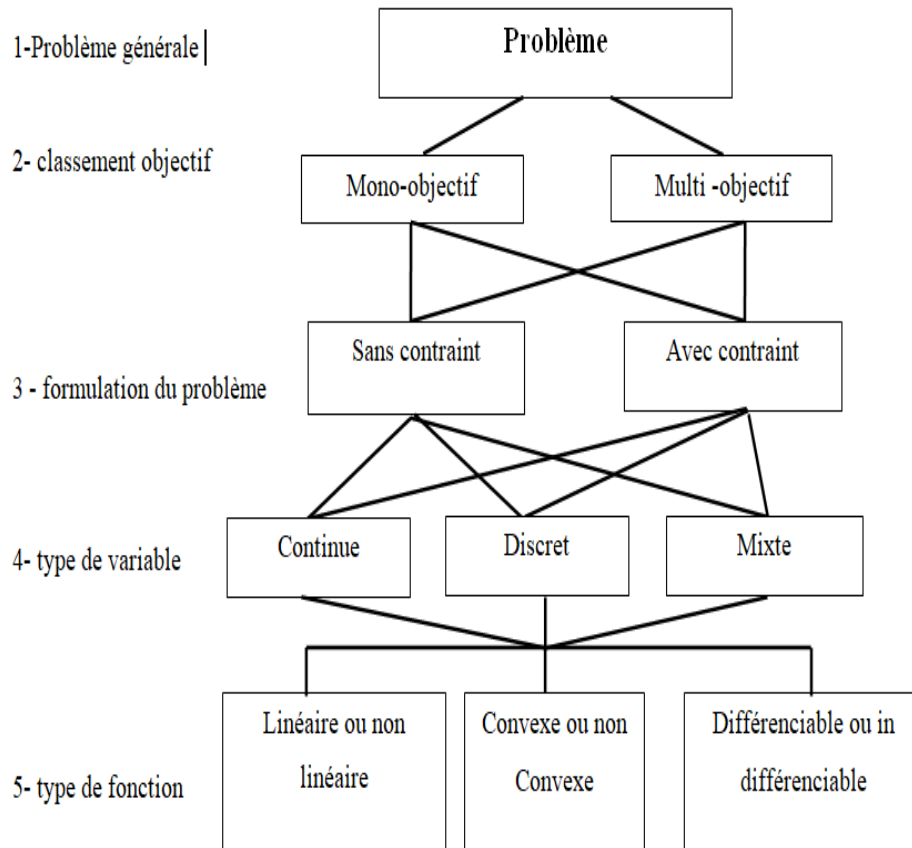


Figure 1.8: Classification des problèmes d’optimisation [32].

1.6.3. Les méthodes d’optimisation

Les méthodes d’optimisation sont des méthodes utilisées pour faciliter l’accès à la solution optimale, et conditionnées par des conditions initiales et des paramètres de contrôle (valeurs initiales des variables de conception, valeurs initiales des paramètres de contrôle, ...). Elles peuvent être distinguées selon le modèle de la boîte noire illustré dans la figure suivante :

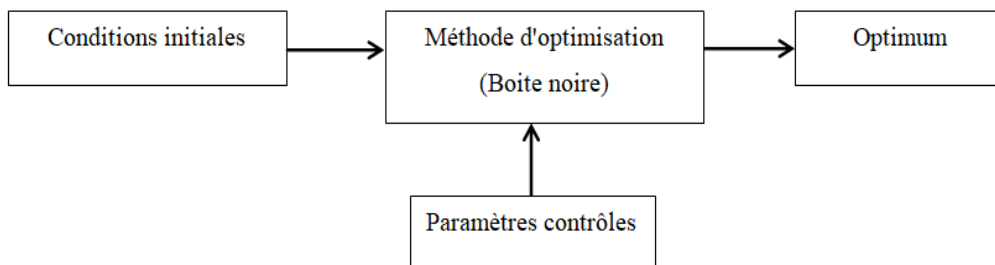


Figure 1.9: Modelé de la boîte noire [36].

La complexification croissante des problèmes d’optimisation a entraîné le développement d’une grande quantité de méthodes de résolution. La globalité de ces techniques d’optimisation dans les différentes publications, se divise typiquement en deux grandes classes : les méthodes déterministes et les méthodes stochastiques.

1.6.3.1. Les méthodes déterministes

Les méthodes déterministes sont des méthodes qui donnent la même solution avec le même nombre d'évaluations de la fonction objectif, bien sûr si l'espace de recherche, le point de départ et les conditions de fin ne changent pas [31]. Cela signifie que ces méthodes garantissent l'accès à la solution, il n'y a donc pas de place pour le hasard. Mais ces méthodes s'avèrent malgré les progrès réalisés plutôt inefficaces à mesure que la taille du problème devient importante (problème d'explosions) [37]. Ces méthodes sont des méthodes de recherche locale. La figure suivante présente les méthodes déterministes les plus utilisées.

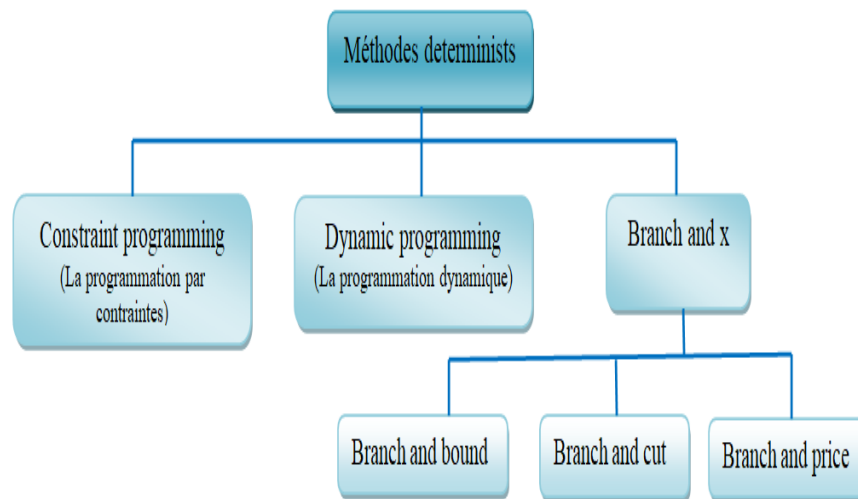


Figure 1.10: Les méthodes déterministes les plus utilisées [38].

1.6.3.2. Les méthodes stochastiques

Ces dernières années, il y a eu une croissance exponentielle de l'utilisation de l'optimisation stochastique. Ce sont des méthodes caractérisées par leur capacité de trouver une bonne solution en peu de temps, et cela est dû à la propriété aléatoire [39]. Contrairement aux méthodes déterministes, l'utilisation de ces méthodes pour atteindre la solution optimale ne nécessite pas la connaissance du gradient de la fonction objectif ni du point de départ mais elles demandent un nombre important d'évaluation de la fonction objectif [36,40]. Ces méthodes sont caractérisées par la propriété d'aléatoire (appelée aussi les mécanismes de transition probabilistes) qui permet de donner des solutions différentes et des implémentations successives d'une même configuration initiale du problème d'optimisation [36,40]. Ces méthodes sont des méthodes de recherche globale. La figure suivante présente les méthodes stochastiques les plus utilisées :

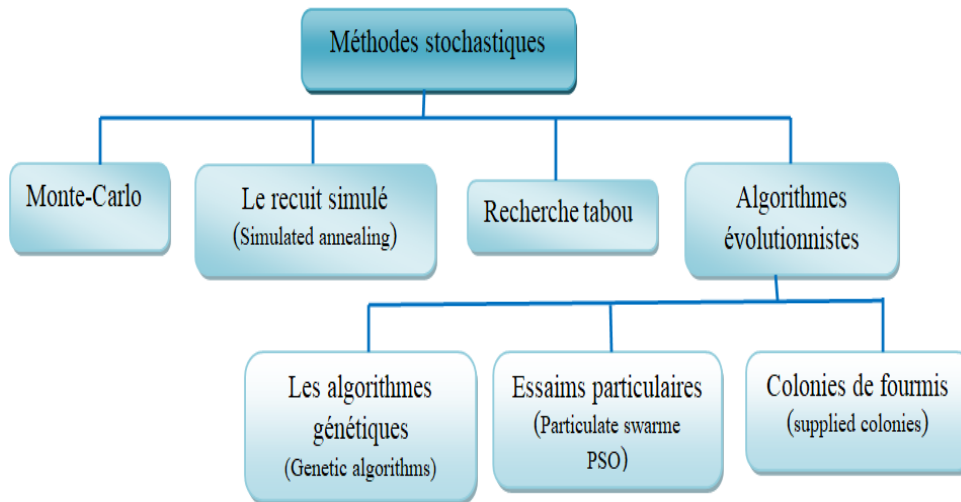


Figure 1.11: Les méthodes stochastiques les plus utilisées [40,41].

1.7. Conclusion

Ce premier chapitre vise à lever l'ambiguïté sur les termes et les concepts les plus importants dans le domaine de la sécurité industrielle, ainsi que sur les mots clés les plus importants auxquels nous serons confrontés dans les chapitres suivants.

La première section est consacrée à la clarification des notions du système, du danger, du risque, du risque majeur, de la sécurité et la sécurité fonctionnelle. Ensuite, nous avons rappelé les accidents majeurs les plus importants au niveau mondial et national. Après cela, nous sommes passés à la démarche de gestion des risques, où nous avons brièvement expliqué les différentes étapes de ce processus. Quant au quatrième titre, il visait à clarifier la notion des barrières de sécurité et à les classer selon les deux critères : la nature et la fonction. Enfin, nous avons parlé de l'optimisation en tant que concept et processus, ainsi que de la classification des méthodes d'optimisation en tant qu'outil pour atteindre la solution optimale et prendre la bonne décision.

Références du chapitre 01 :

- [1] Liddell, H. G., Scott, R., & Drisler, H. (1894). A Greek-English Lexicon. Harper & Brothers.
- [2] Lecourt, D. Bourgeois. (2006). Dictionnaire d'histoire et philosophie des sciences. Presses universitaires de France.
- [3] Le Moigne, J. L. (1994). La théorie du système général : théorie de la modélisation. FeniXX.
- [4] Innal, F. (2008). Contribution to modelling safety instrumented systems and to assessing their performance critical analysis of IEC 61508 standard. University of Bordeaux.
- [5] Desroches, A. (1995). Concepts et méthodes probabilistes de base de la sécurité, Lavoisier-TEC&DOC, Paris.
- [6] IEC 61508 (2010), Functional Safety of Electrical/electronic/programmable Electronic Safety Related Systems, 2nd ed., IEC 61508 Standard, Geneva.
- [7] OHSAS 18001 (1999). Système de management de la santé et de la sécurité au travail - Spécification. BSI, AFNOR.
- [8] ISO/CEI Guide 51 (1999). Aspects liés à la sécurité : Principes directeurs pour les inclure dans les normes. Organisation internationale de normalisation (ISO).
- [9] Villemeur, A. (1988). Sureté de fonctionnement des systèmes industriels : fiabilité-facteurs humains, informatisation.
- [10] Lievens, C. (1976). Sécurité des systèmes. Cepadues éditions, Toulouse, France.
- [11] Ineris. (s. d.). Consulté 24 Avril 2023, à l'adresse <https://www.ineris.fr/fr/risques/est-risque/politiques-environnementales-risques>.
- [12] La loi n° 04-20 du 25 décembre 2004 relative à la prévention des risques majeurs et à la gestion des catastrophes dans le cadre du développement durable.
- [13] Département Éducation Cité des sciences et de l'industrie. (2014). Les risques : Dossier pédagogique pour collège et lycée. 75019 PARIS <http://www.cite-sciences.fr>
- [14] Margossian, N. (2006). Risques et accidents industriels majeurs : Caractéristiques, réglementation, prévention. Dunod.
- [15] Risque d'incendies : 4 000 installations industrielles implantées en milieu urbain— L'Actualité : Liberté. (S. d.). Consulté 24 janvier 2023, à l'adresse <https://www.liberte-algerie.com/actualite/4-000-installations-industrielles-implantees-en-milieu-urbain-368355>

- [16] www.larousse.fr/dictionnaires/francais
- [17] IEC 61511 (2016), Functional Safety – Safety Instrumented Systems for the Process Industry Sector, 2nd ed., International Standard, Geneva.
- [18] Benmissi, A., & Boulkaibet, A. (2017). La question du risque industriel et le développement durable en Algérie.
- [19] Site Officiel de Protection Civile Algérie, "Historique des catastrophes 1962-2012 ». (s. d.). Consulté 15 Avril 2023, à l'adresse <https://dgpc.dz/historique-des-catastrophes-1962-2012/>.
- [20] Conseil National DES assurances. (2021). Revue de presse 2020 spécial, Risques industriels.
- [21] Pesqueux, Y. (2003, May). Le concept de risque au magasin des curiosités. In Identification et maîtrise des risques : enjeux pour l'audit, la comptabilité et le contrôle de gestion (pp. CD-Rom).
- [22] PERILHON, P. (1997). Sécurité des installations. Méthode MADS-MOSAR, CEA INSTN.
- [23] Fumey, M. (2001). Méthode d'évaluation des risques agrégés : application au choix des investissements de renouvellement d'installations (Doctoral dissertation).
- [24] Sklet, S. (2006). Safety barriers: Definition, classification, and performance. Journal of loss prevention in the process industries, 19(5), 494-506.
- [25] Safety barriers: Research advances and new thoughts on theory, engineering and management
- [26] Yuan, S., Yang, M., Reniers, G., Chen, C., & Wu, J. (2022). Safety barriers in the chemical process industries: A state-of-the-art review on their classification, assessment, and management. Safety science, 148, 105647.
- [27] INERIS DRA-17. (2018). Rapport Ω 10, Évaluation de la performance des Barrières Techniques de Sécurité.
- [28] ARAMIS, I. D. (2004). Développement d'une méthode intégrée d'analyse des risques pour la prévention des accidents majeurs. Ministère de l'Écologie et du Développement Durable–INERIS.
- [29] OPTIMIZATION | English meaning—Cambridge Dictionary. (s. d.). Consulté 24 Mars 2023, à l'adresse <https://dictionary.cambridge.org/dictionary/english/optimization>
- [30] Sun, W., & Yuan, Y. X. (2006). Optimization theory and methods: nonlinear programming (Vol. 1). Springer Science & Business Media.

- [31] Qing, A. (2009). Differential evolution: fundamentals and applications in electrical engineering. John Wiley & Sons.
- [32] Sarker, R. A., & Newton, C. S. (2007). Optimization modelling: a practical approach. CRC press.
- [33] Balachandran, M. (1993). Knowledge-based optimum design, [in:] Topics in Engineering, vol. 10, CA BREBBIA, JJ CONNOR.
- [34] Boussaid, I. (2013). Perfectionnement de métaheuristiques pour l'optimisation continue (Doctoral dissertation, Paris Est).
- [35] Deb, K. (2012). Optimization for engineering design: Algorithms and examples. PHI Learning Pvt. Ltd.
- [36] HaJJI, O. (2003). Contribution au développement de méthodes d'optimisation stochastiques. Application à la conception des dispositifs électrotechniques. Mémoire de thèse de Doctorat, Université des sciences et technologies de Lille.
- [37] Gherboudj, A. (2013). Méthodes de résolution de problèmes difficiles académiques. Mémoire de thèse de Doctorat, Université de Constantine2.
- [38] Koopialipoor, M., & Noorbakhsh, A. (2020). Applications of artificial intelligence techniques in optimizing drilling. Emerging Trends in Mechatronics, 89.
- [39] Ghasemalizadeh, O., Khaleghian, S., & Taheri, S. (2016). A review of optimization techniques in artificial networks. Int. J. Adv. Res, 4(9), 1668-1686.
- [40] Abdelhak, H. (2016). Optimisation de la maintenance préventive par les algorithmes génétiques (mémoire de thèse de Magister, University of Souk Ahras).
- [41] Bounou, O., El Barkany, A., & El Biyaali, A. (2021). Contribution Overview to the Evaluation and Development of Spare Parts Management Models: Meta-Heuristic and Probabilistic Methods. Management and Production Engineering Review, 12(1), 24-37.

Chapitre 02 :
Méthodologie de l'analyse
coût bénéfice

2.1 Introduction

Les projets d'investissement sont nombreux et différents tels que les projets technologiques, les projets d'infrastructures routières, ferroviaires, de construction d'édifices (école, hôpital, ...), les projets agricoles, les projets de sécurité, etc. Les entreprises, établissements, usines et même les personnes cherchent, par la mise en place des projets d'investissement de tout type (économique, sécurité, sociale), à générer de l'intérêt et du profit, en particulier sous sa forme monétaire.

Parmi l'un des investissements les plus efficaces dans les entreprises, nous trouvons ceux dans le domaine de la sécurité qui visent à réduire le nombre d'accidents et à atteindre le plus haut niveau possible de performance et d'efficacité. Afin d'atteindre ces objectifs, avant tout nouveau projet, des études préalables sont nécessaires pour analyser le projet et en évaluer les résultats afin d'aider à prendre une décision correcte et d'essayer de le clarifier. À ce titre, l'analyse coûts-bénéfices (ACB) est considérée comme un puissant outil d'évaluation utilisé pour analyser l'efficacité des projets et interventions, et donc pour déterminer le choix le plus approprié qui offre le niveau le plus élevé d'avantage relativement aux ressources investies.

La gestion de la sécurité repose également sur l'utilisation de l'ACB pour appuyer la prise de décision sur les investissements de sécurité et la mise en œuvre de mesures de réduction des risques. Dans cette optique, on retrouve l'ALARP (*As Low As Reasonably Practicable* : aussi faible/ bas que raisonnablement possible) comme principe utilisé pour réduire les risques à un niveau acceptable compte tenu de l'investissement envisagé.

2.2 Définition du projet d'investissement

Le mot « projet d'investissement » se retrouve beaucoup dans notre vie quotidienne (études, travail, ...), et le mot projet désigne souvent des investissements, alors qu'est-ce qu'un projet d'investissement ?

Nous présenterons les définitions des termes « projet » et « investissement » fournies par les institutions internationales de gestion de projet et des spécialistes des domaines de la gestion de projet et de l'économie, pour parvenir à une définition claire et complète du terme projet d'investissement.

Concernant le mot projet, il existe de nombreuses définitions dans la littérature qui varient selon l'auteur et le domaine d'application et dont nous citons :

- ✓ Selon les institutions internationales de gestion de projet, nous tirons les définitions suivantes :

- Le projet Management Institute (PMI) définit le projet comme « *un effort temporaire réalisé en vue de créer un produit, un service ou un résultat unique* » [1].
 - PRINCE (2008) (Projets IN Controlled Environments) définit le projet comme « *une organisation temporaire mise en œuvre dans le but de réaliser des objectifs spécifiques dans les contraintes de coûts, de délais, de qualité et de contenu* » [2].
 - L'association francophone de management de projet (AFITEP) définit le projet comme « *un ensemble d'action à réaliser pour atteindre un objectif défini, dans le cadre d'une mission précise, et pour la réalisation desquelles on a identifié non seulement un début mais aussi une fin* » [2].
- ✓ Selon des spécialistes :
- Corriveau [3] définit le projet comme « *systèmes sociaux vivants capables d'apprendre et de s'auto-organiser, des systèmes complexes par le nombre et la variété des facteurs qui les influencent, des systèmes dynamiques qui ne cessent d'évaluer et de développer, des systèmes dédiés au changement de par leur nature qui concrétisent les choix stratégiques de l'entreprise* ».
 - MbayeA.A.[4] définit le projet comme « *une activité d'investissement dans laquelle des ressources sont utilisées pour obtenir un certain nombre d'avantages, financiers, économiques, sociaux et environnementaux* ».

Concernant le mot investissement nous citons les définitions suivantes :

- ✓ RekiL. [5] définit l'investissement comme les dépenses par lesquelles nous recevons des bénéfices.
- ✓ Selon Thauvron A. [6], un investissement est la somme des dépenses qui sont dépensées pour réaliser un profit futur, et ce profit devrait être réalisé sur plusieurs années.

À partir de ces définitions, nous pouvons avancer qu'un projet d'investissement *est un ensemble d'activités dans lesquelles certaines ressources sont utilisées pour atteindre certains objectifs générant des avantages et des bénéfices sur une période future tout en évitant autant que possible les risques émergents grâce à la coordination et au suivi de la question du temps, des coûts et de l'efficacité.*

Donc le projet d'investissement peut être représentée comme un processus de transformation d'entrées (inputs) en sorties (outputs), où les coûts dessinent les entrées et les bénéfices représentent les sorties (voir figure 2.1).



Figure 2.1: Processus de transformation par les projets d'investissement

2.3 Le cycle de vie d'un Projet

Le cycle de vie du projet décrit le processus qui doit être suivi pour mener à bien le projet, du lancement à la clôture. Il comporte généralement 4 phases, bien que certains auteurs lui attribuent 5 ou 6 phases. Plusieurs auteurs ont proposé des différentes nomenclatures pour définir le cycle de vie d'un projet. Selon Patel et Morrid [7], le cycle de vie est un cycle de base pour la gestion de projet car il influence grandement la façon dont le projet est organisé, qui est une séquence d'étapes au cours desquelles le projet se développe et qui suit l'ordre suivant : l'opportunité, la conception et le développement, la production plus la livraison et l'évaluation de l'après-projet. Archiblad [8] identifie 6 phases spécifiques dans le cycle de vie d'un projet : Concept, Définition, Design, Développement, Application et Post complétion. Par ailleurs, le guide PMBOK [1] indique que le cycle de vie d'un projet passe par quatre phases comme le montre la figure 2.2. Ces étapes peuvent être résumées comme suit :

- ✓ *Démarrage du projet* : phase de démarrage, préparation du projet et prise de conscience de la nécessité et de la possibilité de mettre en place le projet et de définir ses objectifs.
- ✓ *Organisation et préparation* : cette phase consiste à élaborer un plan pour atteindre les objectifs du projet (distribution et établissement des ressources nécessaires au projet).
- ✓ *Effectuer le travail du projet* : mise en œuvre pratique du plan sur le terrain.
- ✓ *Clôture du projet* : achèvement du projet est donc prêt à être livré.

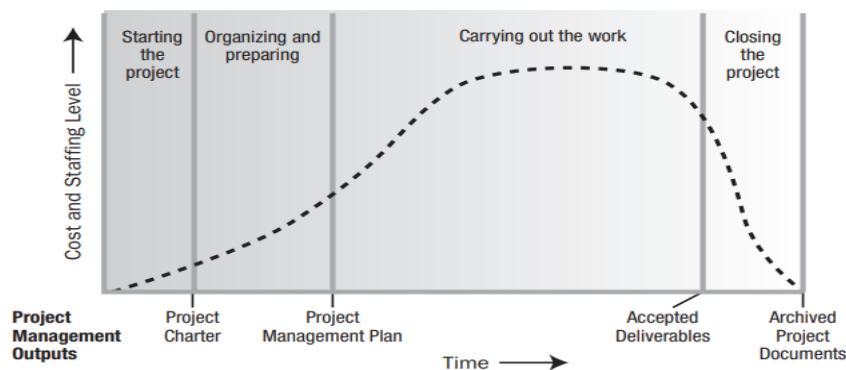


Figure 2.2: Coûts typiques et niveaux de dotation tout au long du cycle de vie du projet

[1].

À travers cette figure, on remarque que les niveaux de coûts sont faibles au début et atteignent un pic lors de la phase de mise en œuvre du projet, puis diminuent vite alors que le projet tire à sa fin.

2.4 Le coût et la sécurité

La relation entre le coût et la sécurité est une relation existentielle : la sécurité est les coûts encourus pour éliminer ou atténuer un risque, et l'insécurité est les coûts d'un événement indésirable peuvent être des décès, des pertes économiques, des dommages environnementaux, des attentes à la réputation, ... Ceci est illustré par la figure 2.3 qui montre la relation entre les coûts et le niveau de sécurité.

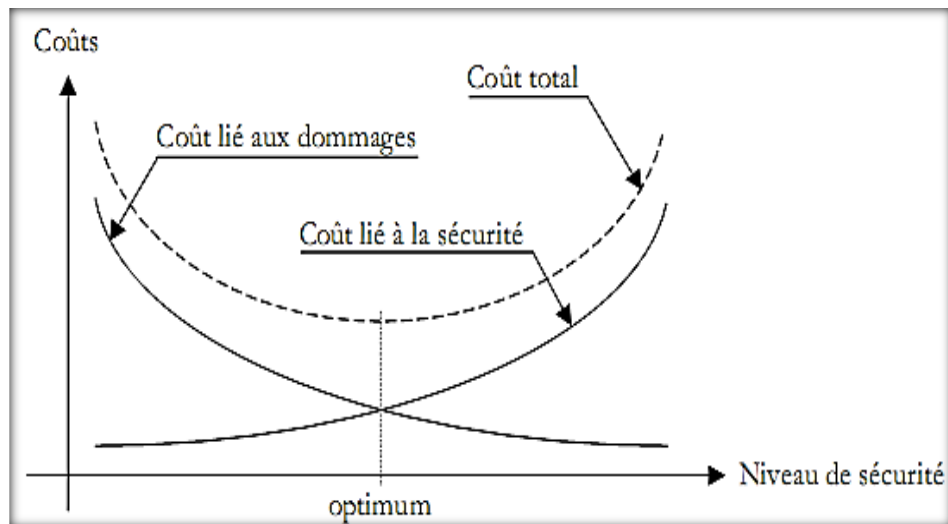


Figure 2.3: Relation entre les coûts et le niveau de sécurité [9].

À partir de cette figure, on peut remarquer les points suivants :

- ✓ Assurer la sécurité nécessite des dépenses (la sécurité a un coût).
- ✓ Les coûts liés aux dommages sont énormes en l'absence de sécurité.
- ✓ Les coûts liés aux dommages diminuent en parallèle avec la hausse des coûts liés à la sécurité jusqu'à un point appelé « optimum », qui donne la valeur optimale des coûts liés à sécurité par rapport aux coûts liés aux dommages (équivalence entre les deux coûts).
- ✓ Après ce point, on observe une augmentation déraisonnable des coûts liés à la sécurité par rapport à la faible valeur des coûts liés aux dommages.

À cet effet, les entreprises établissent des critères d'acceptabilité des risques en fonction des effets et des niveaux de probabilité des événements dangereux. Cela est concrétisé sous l'appellation : *la grille (ou matrice) du risque (ou de criticité)*, qui représente est une vision

graphique de là l'intersection entre les gravités et les probabilités dans un repère binaire. L'objectif de la répartition des risques dans la grille est de déterminer les risques qui nécessitent un investissement de sécurité, et donc la répartition optimale des coûts de sécurité.

Le risque est souvent classé en trois catégories selon l'acceptabilité : inacceptable, tolérable et acceptable. Selon la norme ISO/IEC 51 [10], le risque acceptable est le niveau de risque qui est accepté dans un contexte donné sur la base des valeurs actuelles de la société. L'idée de l'acceptabilité est déterminée en fonction d'un ensemble de critères (critères d'acceptabilité) et rendue opérationnelle (niveaux de risque) au niveau de la matrice de risques. Elle permet donc d'améliorer, de réviser ou de proposer des mesures de réduction du risque.

Dans le cas d'absence de risque réel, une question se pose alors : *Les coûts de réduction des risques sont-ils justifiés ou non ?* Dans ce cas de figure, le principe ALARP peut être mis à profit afin d'optimiser l'affectation des ressources. Un risque est qualifié d'ALARP (ou tolérable) si le coût de sa réduction est manifestement disproportionné par rapport à l'amélioration qui en résulte. Rappelons que les risques inacceptables doivent être réduits, le cas échéant le système doit être interdit de fonctionner. Pour les risques négligeables ou acceptables aucune obligation de réduction n'est exigée mais bien sûr le contrôle et le suivi devraient être continu.

La relation entre le coût et la sécurité nécessite un regard sur l'économie de la sécurité (*safety-economics*), qui est un domaine de recherche universitaire interdisciplinaire axé sur les interdépendances et la coévolution de l'économie et de la sécurité pour garantir leur compromis [11]. Ces recherches académiques remontent aux années 1960 où l'économie était considérée comme l'une des dimensions de la sécurité [12], qui vise à créer une stratégie de sécurité qui réduit les coûts totaux des accidents potentiels et les coûts de prévention des accidents. La figure suivante fournit plus de détails sur la relation entre la sécurité, l'économie et l'économie de la sécurité.

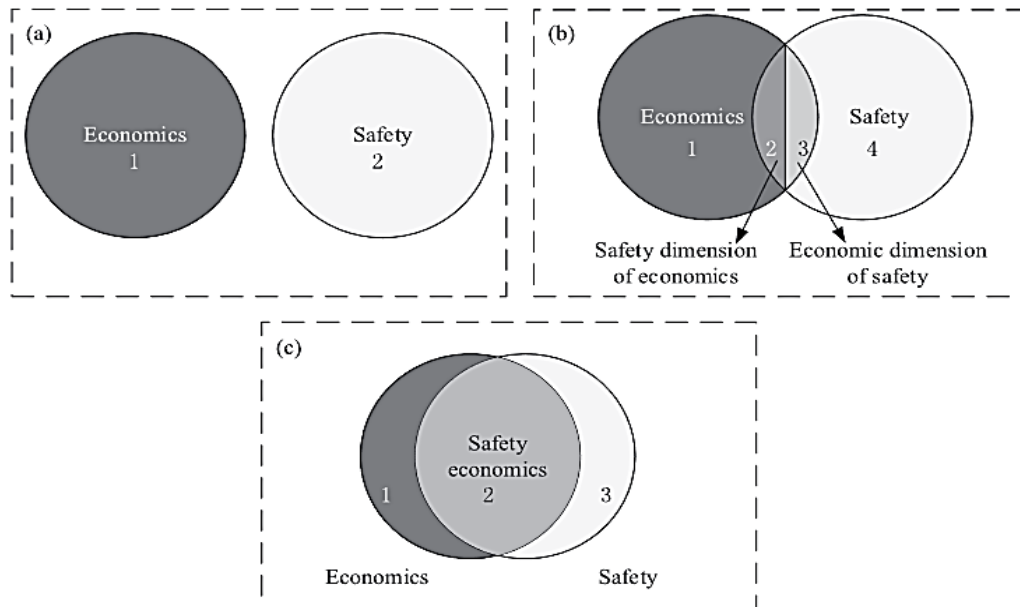


Figure 2.4: Les relations entre la sécurité, l'économie et l'économie de la sécurité [11].

La figure 2.4 contient 3 parties :

- ✓ *Partie (a)* : cette partie représente l'absence de lien entre la sécurité et l'économie dans le processus décisionnel, telle que la décision de l'Allemagne de fermer toutes les centrales nucléaires à la fin de 2022. Cette décision était principalement liée aux risques de l'utilisation de l'énergie nucléaire et ne tient pas compte de son intérêt économique (avantages).
- ✓ *Partie (b)* : montre l'étape primaire de l'économie de la sécurité qui se divise en quatre sous parties (1, 2, 3, 4) :
 - Les sous parties 1 et 4 représentent l'indépendance de la sécurité par rapport à l'économie et vice versa.
 - Les sous parties 2 et 3 représentent deux dimensions différentes de l'économie de la sécurité :
 - *Sous partie 2* : la dimension sécuritaire de l'économie (*safety dimension of economics (SDE)*), dans laquelle les questions de sécurité sont prises en compte dans l'analyse économique pour obtenir une rentabilité à long terme. Cela peut être interprété comme équilibrant les coûts des risques et des avantages économiques du point. Par exemple : la prise en compte de la distance de sécurité dans la conception de l'aménagement des usines chimiques.
 - *Sous partie 3* : la dimension économique de la sécurité (*economic dimension of safety (EDS)*), dans laquelle les facteurs économiques sont abordés dans l'analyse de la sécurité pour rendre la prise de décision liée à la sécurité plus

rentable, cela peut être interprété comme équilibrant les coûts de la diminution des risques et des avantages en matière de sécurité, par exemple : prise en compte du budget de sécurité dans la prise de décision en matière de sécurité.

- ✓ *Partie (c)* : montre la condition idéale dans laquelle l'économie de la sécurité s'établit en intégrant science et économie de la sécurité (sous partie 2).

2.5 Le principe ALARP

Le terme ALARP a émergé entre la fin des années 1960 et la fin des années 1980. On trouve son origine dans une affaire judiciaire anglaise de 1949 (le cas de la mort de Mr Edward dans l'effondrement d'une mine) [13]. Le tribunal a estimé que « ... dans chaque cas, c'est le risque qui doit être mis en balance avec les mesures nécessaires pour l'éliminer. Plus le risque est grand, sans aucun doute, moins il y aura de poids à accorder au facteur coût » [14]. Le principe ALARP est considéré comme la clé de la tolérance du cadre de risque utilisé par le Health and Safety Executive (HSE) du Royaume-Uni, dans la réglementation des risques dans l'industrie et par les entreprises qui gèrent les risques des installations présentant des risques d'accidents majeurs [15]. Ce principe est utilisé pour décrire le niveau de risque qui doit être contrôlé sur le lieu de travail. Pour décider si ALARP est atteint, il faut répondre sur les questions suivantes :

- Y a-t-il plus à faire pour réduire le risque ?
- Si oui d'autres mesures sont-elles raisonnablement réalisables ?

Le principe ALARP est décrit à la figure 2.5 dérivée de [16], où des niveaux de risque quantifiés sont placés sur les limites entre les zones « intolérable ou inacceptable », « ALARP ou tolérable » et « acceptable ».

RQ : ALARP, ALARA, SFAIRP sont considérés comme équivalents en termes de sens Et de finalité.

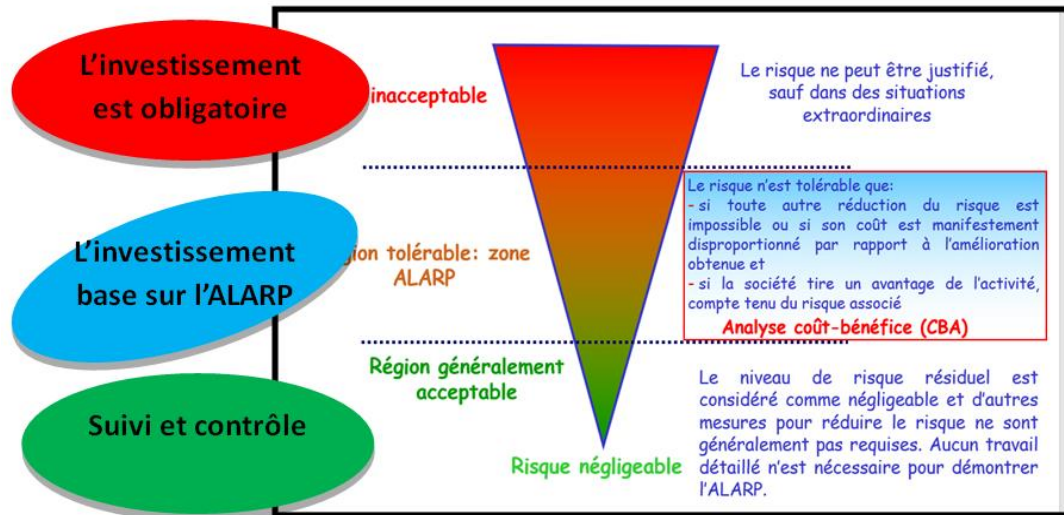


Figure 2.5: Principe ALARP

À partir de cette figure, on peut dire que ce principe incarne plusieurs concepts :

- ✓ Risques inacceptables qui ne peuvent être justifiés que dans des circonstances extraordinaires,
- ✓ Risques tolérables considérés comme acceptables si une réduction supplémentaire des risques est impossible, c'est-à-dire le bénéfice ne l'emporte pas sur l'impact,
- ✓ Risques largement acceptables ou négligeables qui sont si faibles pour ne pas être préoccupants,
- ✓ Le risque décroissant et le bénéfice proportionnel décroissant lorsque le risque est réduit, sont représentés par le triangle,
- ✓ Les efforts pour réduire le risque doivent être poursuivis jusqu'à ce que le sacrifice supplémentaire soit nettement disproportionné par rapport à la valeur de la réduction du risque supplémentaire obtenue. Le sacrifice est défini en termes de coût, de temps, de l'effort ou d'autres dépenses de ressources.

On remarque aussi que le principe ALARP détermine deux limites (2 critères) de tolérance au risque, qu'elles sont :

- ✓ La limite supérieure représente la ligne de démarcation entre les régions inacceptables et tolérables, généralement appelés « *risque maximal tolérable* » ou « *risque manifeste* », qui est une exigence minimale qui doit être respectée.
- ✓ La limite inférieure représente la ligne de démarcation entre les régions tolérable et largement acceptables, généralement appelés « *risque minimal tolérable* » ou « *risque de minimise* ». C'est un objectif que nous essayons d'atteindre jusqu'à ce que les mesures de réduction des risques contiennent des sacrifices disproportionnés. Autrement dit, l'ALARP vise à convertir le risque d'un niveau *manifeste* à un niveau

de minimise et d'atteindre un niveau du risque où des nouvelles réductions du risque sont disproportionnés par rapport aux coûts supplémentaires.

Plus simplement, un risque est dit ALARP si l'inéquation suivante est vérifiée [14 ; 17] :

$$\text{Coût de la réduction du risque} / \text{Bénéfice obtenu de cette réduction} \leq DF \quad (2.1)$$

DF : facteur de disproportion (Disproportion factor).

Selon la CEI 61508-5 (2010) [18] et la CEI 61511-3 (2016) [16], afin de mettre en œuvre le principe ALARP, 3 classes de risque sont établies (voir les tableaux 2.1 et 2.2). Ces deux tableaux sont déterminés et adaptés selon le type de secteur industriel après négociations et discussions entre décideurs en fonction des réglementations, des normes

Tableau 2.1: Exemple de classification des risques [16].

Probabilité	Classe de risque			
	Conséquence catastrophique	Conséquence critique	Conséquence marginale	Conséquence négligeable
Fortement probable	I	I	I	II
Probable	I	I	II	II
Possible	I	II	II	II
Peu probable	II	II	II	III
Improbable	II	III	III	III
Invraisemblable	II	III	III	III

Tableau 2.2:Interprétation des classes de risque [16].

Classe de risque	Interprétation
Classe I	Risque intolérable
Classe II	Risque indésirable et uniquement tolérable si la réduction du risque est impossible ou si les coûts sont manifestement disproportionnés par rapport aux améliorations obtenues
Classe III	Risque négligeable

ALARP est le principe de recherche d'équilibre entre les coûts et les bénéfices par le biais de l'analyse coût bénéfice (ACB) pour obtenir une valeur quantitative limitée et définie avec précision. L'utilisation de l'ACB réduit la question de l'acceptabilité à celle de rentabilité : pour donner des arguments quantitatifs et numériques, la langue monétaire est la langue la plus claire pour tous.

Selon [19], la disproportion entre les coûts et les avantages obtenus se traduit par l'estimation du coût implicite pour éviter un décès (ICAF). Cet indicateur, qui représente le coût d'un investissement, est le rapport entre le coût de l'investissement réalisé et la diminution attendue du nombre de décès du fait de l'action d'atténuation :

$$\text{ICAF} = \frac{\text{Coût de la mesure de sécurité}}{\text{Réduction des pertes de vie potentielles (PLL: Potential Loss of Life)}} \quad (2.2)$$

Par comparaison entre la valeur obtenue et la valeur de référence, on décide si la barrière de sécurité est réalisable ou non.

Dans la plupart des cas, pour déterminer si les risques sont ALARP, il faut comparer les mesures de contrôle mises en place ou proposées par le détenteur d'obligations avec les mesures que l'on s'attendrait normalement à trouver dans de telles circonstances, c'est-à-dire les bonnes pratiques pertinentes [20].

2.6 Approche en couches pour vérifier le principe ALARP

Cette approche a été introduite par Aven and Vinnem (2007) [21] et ensuite développée par Aven (2011) [22]. Elle vise à montrer que l'ACB (ou l'ACE : analyse coût-efficacité) doit être utilisé avec prudence car il ne donne pas suffisamment de poids aux incertitudes. Cette approche se compose de trois étapes, comme indiqué dans la figure 2.6.

- ✓ *Première étape* : la mesure de sécurité doit être mise en place si le coût de la mesure est faible.
- ✓ *Deuxième étape* : avec l'augmentation des coûts, des analyses plus détaillées sont nécessaires pour prendre une décision sur les investissements de sécurité. À cette fin, une ACB peut être effectuée pour la prise de décision, où les mesures satisfaisant la condition suivante doivent ensuite être appliquées : ENPV (*Expected Net Present Value*) > 0. De plus, une analyse coût-efficacité peut également être adoptée comme base pour la prise de décision. Une mesure de sécurité doit alors être mise en œuvre si le coût attendu par nombre attendu de vies sauvées, également appelé coût implicite pour éviter un décès (ICAF) est faible ICAF < X.
- ✓ *Troisième étape* : Il découle de ces étapes qu'une mesure de sécurité peut être considérée comme appropriée, même si une analyse ACB ou ACE conclut qu'il n'y a pas d'investissement, étant donné que d'autres questions telles que les incertitudes élevées doivent également être prises en compte.

Pour une revue complète de l'approche multicouche, nous renvoyons le lecteur aux références [22 ;23].

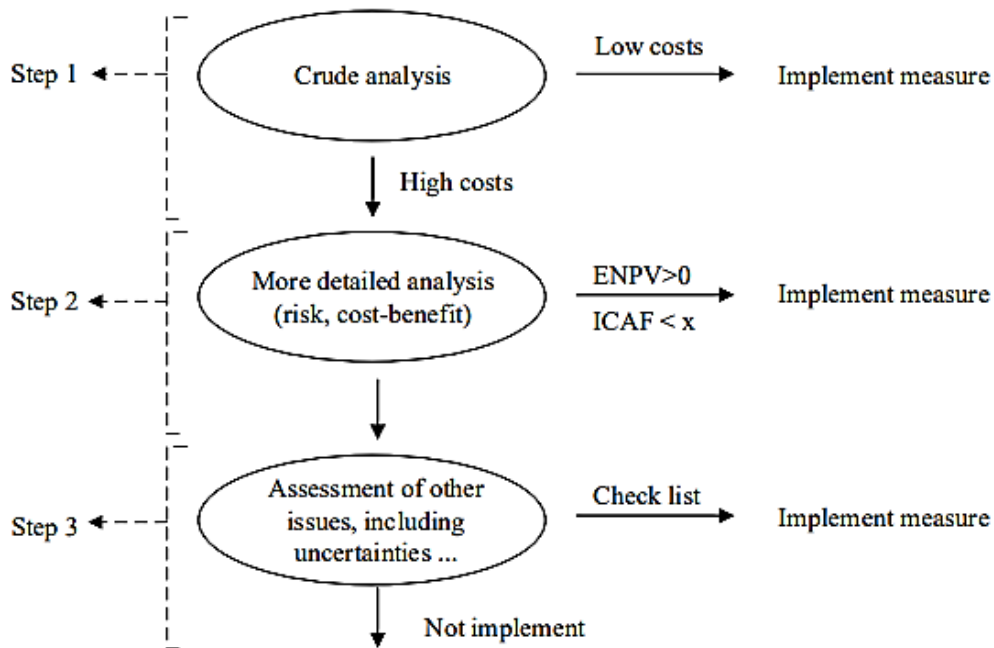


Figure 2.6: Approche en couches pour la mise en œuvre de l'ALARP et du critère de disproportion [22].

2.7 Analyse coût-bénéfice (ACB)

Le concept d'analyse coûts-bénéfices (ACB) a été inventé par l'économiste français Jules Dupuit, au milieu du 19^e siècle, pour tenter de répondre à la question de savoir quelle est la rentabilité sociale d'un projet tel que la construction d'une route ou d'un pont [24]. En 1930, les États Unis ont fait un travail important pour contrôler le niveau de l'eau et des inondations en s'appuyant sur l'ACB, ce qui est considéré comme une véritable naissance de l'ACB dans sa capacité d'influencer les décisions publiques. Après la Seconde Guerre mondiale, des efforts ont été faits pour rechercher des moyens d'assurer une utilisation efficace des fonds investis dans de grands projets par le secteur public comme : la construction des aéroports (London et Nice), d'autoroutes (l'A86 à l'ouest de paris), etc. Depuis les années 1960, l'ACB a connu une révolution diversifiée et s'est imposée comme une méthode de premier plan pour l'évaluation des investissements et des politiques de pouvoir publique. Cette période est considérée comme son âge d'or avec l'analyse des projets militaires étonnants aux États-Unis [25]. Notons que le terme « analyse coût-bénéfice » est un anglicisme. En français, le terme exact est « analyse coût-avantage ».

2.7.1 Définition de l'analyse coût-bénéfice

L'analyse coûts-bénéfices est utilisée comme un outil important pour la prise de décision dans de nombreux domaines (transport, santé, agriculture, sécurité, ...). C'est pourquoi on trouve de nombreuses définitions qui sont différentes dans la forme et communes dans le sens. Nous mentionnons les définitions suivantes :

L'analyse coûts-bénéfices (ACB) est un outil utilisé pour déterminer si un investissement représente une utilisation efficace des ressources [26]. Selon [27 ; 28], l'ACB est une méthode d'évaluation économique qui permet de comparer les coûts et les bénéfices de différents projets ou options politiques. Pour la référence [16], la définition est la suivante : l'analyse coût-bénéfice est une évaluation économique dans laquelle tous les coûts et conséquences d'une décision donnée sont exprimés dans les mêmes unités, généralement l'argent. La référence [09] donne une définition de l'ACB, en considérant que les projets sont des projets de sécurité qui réduisent le risque, comme suit : l'ACB est un outil méthodologique permettant de comparer différents projets propres à réduire les risques émanant d'un établissement à risque d'accident majeur.

À travers ces définitions, on peut dire que : *l'ACB est une technique conçue pour faciliter la prise de décision en matière des projets, des stratégies ou des politiques, pouvant être définie dans le cadre d'une étude de faisabilité économique, elle constitue un outil d'aide au processus de décision reposant sur une analyse détaillée des éléments de coûts et d'avantages des projets proposés pour juger leur rentabilité économique. Le produit final est un nombre ou des chiffres montrant la valeur du projet proposé.*

2.7.2 Objectif de l'ACB

L'analyse coût bénéfice comporte un certain nombre d'objectifs, dont le plus importants sont les suivants :

- ✓ Guider la prise de décision future et permettre l'investissement optimal,
- ✓ Donner une justification économique du choix des activités et de la priorité qui leur est accordée,
- ✓ Orienter l'allocation et le déploiement futurs de ressources,
- ✓ Développer un concept de projet complet et clarifier les exigences futures pour l'exécution de la gestion de projet et ainsi fournir le budget requis pour ce dernier,
- ✓ Fournir les éléments améliorant la transparence du processus décisionnel comme :
 - Clarifier les éléments pris en compte dans l'analyse et fournir un cadre structuré pour débattre de leur importance relative,

- Intégrer les intérêts des différentes parties prenantes,
- Favoriser la concertation, l'échange d'information, voire la contestation d'une décision en fournissant un cadre structuré pour les composants d'une décision.

2.7.3 Principe général de l'ACB

Nous nous sommes appuyés sur les références suivantes [17 ; 25 ; 26 ; 29-31] pour aboutir à la notion de principe général l'ACB. Ce principe est simple : parvenir à toutes les décisions dont les bénéfices l'emportent sur leurs coûts. L'ACB vise à identifier et quantifier les bénéfices (*conséquences positives*) et les coûts (*conséquences négatives*) d'une décision pour prendre une décision qui garantit un bénéfice supérieur au coût. L'ACB est donc un outil analytique qui peut aider les décideurs à allouer les ressources de manière efficace et fournir un cadre logique pour l'analyse des données (les éléments d'une décision).

L'ACB compare directement les bénéfices aux coûts. À cette fin, tous les bénéfices et coûts sont généralement convertis en unité monétaire, on compare donc des dinars à des dinars, etc. C'est ce que l'on appelle « *le langage de l'argent* », qui est facilement compris, puisque ce langage quantitatif commun existe et est considéré comme un outil de communication utile.

- **Exemple :**

Pour un ingénieur inexpérimenté et pour la direction de l'entreprise, l'importance de la différence entre un système avec une disponibilité de 0.99 et un système avec une disponibilité de 0.999 peut être difficile à saisir. Cela peut être étonnamment vrai lorsque la différence de prix d'achat entre ces deux systèmes peut atteindre plusieurs milliers de dollars.

Le problème de cette opération est la conversion monétaire, parce qu'elle pose un problème et suscite critique et émotions. En particulier, pour la partie concernant les bénéfices (*les bien non marchands n'ont pas de prix, mais ont néanmoins une valeur*), elle implique que des éléments relatifs à la santé, à la qualité de l'environnement ou à la mortalité peuvent être « monétarisés », parce que l'appréciation critique de l'âme humaine est très difficile. Alors si les bénéfices futurs n'ont pas de valeur financière, on va tenter de les donner une valeur monétaire.

Du fait que ces bénéfices ou ces coûts sont obtenus dans le futur, on cherchera avec le taux d'actualisation à remplacer ces valeurs futures par une valeur présente. Cela implique alors la détermination de l'horizon temporel au cours duquel les coûts et les bénéfices seront comptabilisés.

L'ACB utilise de nombreux indicateurs pour déterminer et choisir la décision la plus appropriée, tels que : la valeur actuelle nette (ENPV) et le rapport bénéfices-coûts.

L'ACB aide le décisionnaire à répondre aux questions, selon le domaine de projet, telles que :

- Est-ce que la proposition fournit un bénéfice net à la société toute entière ?
- Devrait-on mettre en œuvre le projet ou programme considéré ?
- Le faisons-nous correctement ?
- Parmi les alternatives, comment choisir ?
- Quels sont les bénéficiaires et les perdants des différentes options envisagées dans l'espace et le temps ?

Les réponses aux questions ci-dessus sont basées sur les facteurs suivants :

- Si la valeur des bénéfices spécifiés est supérieure à la valeur des coûts, la mise en œuvre du projet ou programme doit être poursuivie,
- Si la valeur des coûts spécifiés est supérieure à la valeur des bénéfices, l'exécution ne doit pas continuer,
- Si plusieurs alternatives doivent être évaluées, il faut choisir l'option qui confère une plus grande proportion d'avantages aux coûts : l'alternative présentant le plus grand avantage par rapport aux coûts est le candidat prioritaire à la mise en œuvre.

Dans les projets d'investissement de sécurité, cette analyse consiste à comparer sur une durée déterminée les bénéfices générés par une mesure de réduction du risque à son coût de mise en œuvre. Il est à préciser que les bénéfices représentent les dommages évités grâce à la mise en place de la barrière de sécurité. L'ACB revient donc à une comparaison entre deux situations : la première avec la présence de la barrière et la seconde sans celle-ci. Autrement dit, l'ACB offre une méthodologie pour l'évaluation des coûts et des bénéfices qui permet d'établir des comparaisons générales entre les mesures de réduction des risques pour la santé et la sécurité sur une base cohérente, ce qui confère une certaine transparence au processus de prise de décision [20]. À ce titre, faire le lien entre les résultats d'analyse quantitative des risques (*QRA : Quantitative Risk assessment*) avec l'ACB permet de déterminer si des mesures de réduction des risques doivent être mises en œuvre afin de démontrer le respect du principe ALARP [32].

À cet égard, nous mentionnons que G. Reniers et T. Brijs [26] ont développé un outil appelé CESMA pour effectuer des analyses coûts-bénéfices et des analyses coûts-efficacité des investissements de sécurité pour réduire les risques liés aux accidents majeurs.

2.7.4 Les étapes de l'ACB

L'analyse coûts-bénéfices consiste en une séquence d'étapes qui varient selon les auteurs et le domaine. Le tableau 2.3 montre ces étapes selon les auteurs.

Tableau 2.3: Les étapes de l'ACB

Réf Étapes	[33]	[30]	[34]	[35]	[28]
1	Définition concertée du périmètre d'analyse	Mettre en place les pré requis organisationnels	Identification des résultats	Élaboration du scénario de référence et de ses alternatives	Définition des options du projet à évaluer
2	Détermination de l'exposition du territoire au risque	Spécifier les différents scénarios ou projets	Quantification des résultats bruts	Définition du périmètre de l'étude	Décision sur les coûts et les bénéfices à prendre en compte
3	Évaluation des bénéfices	Préciser la portée de l'analyse : décider pour quels agents économiques on va mesurer les conséquences	Mesure de la contribution et du contrefactuel	Identification des impacts associés à chaque scénario	Sélection des mesures et mesure de tous les coûts et bénéfices
4	Évaluation des coûts des mesures	Lister les conséquences et choisir leurs indicateurs de mesure	Quantification de l'impact (résultats nets)	Traduire monétairement ces impacts en coûts et bénéfices	Estimation du résultat des coûts et des avantages sur la période pertinente
5	Calcul des indicateurs synthétiques de l'ACB	Prédire quantitativement les conséquences sur la durée de vie du projet	Monétisation des impacts	Calcul de la VAN	Conversion de tous les coûts et bénéfices dans une monnaie commune
6	Analyse de la sensibilité	Monétiser les conséquences	Analyse de la trésorerie et actualisation	Tests de sensibilité	Actualiser les coûts et les avantages en valeur actuelle
7	-	Actualiser coûts et bénéfices futurs, afin d'obtenir la valeur nette actualisée de chaque projet	-	-	Calcul de la VAN des options du projet
8	-	Analyser la robustesse des résultats aux paramètres choisis	-	-	Réalisation des analyses de sensibilité
9	-	Faire une recommandation de décision	-	-	Recommandations basées sur la VAN et l'analyse de sensibilité

Sur la base des étapes mentionnées dans le tableau précédent, nous pouvons diviser l'analyse coûts-bénéfices des projets de sécurité en six étapes, à savoir :

- 1.** Déterminer les scénarios d'accidents et des risques qui seront traités.
- 2.** Déterminer le projet de sécurité nécessaire : évaluer les performances du système de sécurité et proposer les évolutions de sécurité nécessaires.
- 3.** Identifier et estimer les exigences (coûts) du projet (mesures de sécurité proposée) : lister les coûts de ces mesures.
- 4.** Identifier et estimer les bénéfices du projet.
- 5.** Actualiser les conséquences : elle contient deux étapes, une phase spécifique aux coûts et une autre spécifique aux bénéfices. Cette phase peut être combinée avec les phases 3 et 4.
- 6.** Calculer les indicateurs synthétiques de l'ACB.
- 7.** Analyse de la sensibilité.

T. Brijs et G. Reniers [36] ont simplifié ce processus et ces étapes comme suit: (i) identification des coûts de la prévention et des avantages des accidents évités, (ii) calcul des valeurs actuelles de tous les coûts et avantages, (iii) comparaison des coûts et bénéfices totaux. Ces étapes sont illustrées dans la figure suivante.

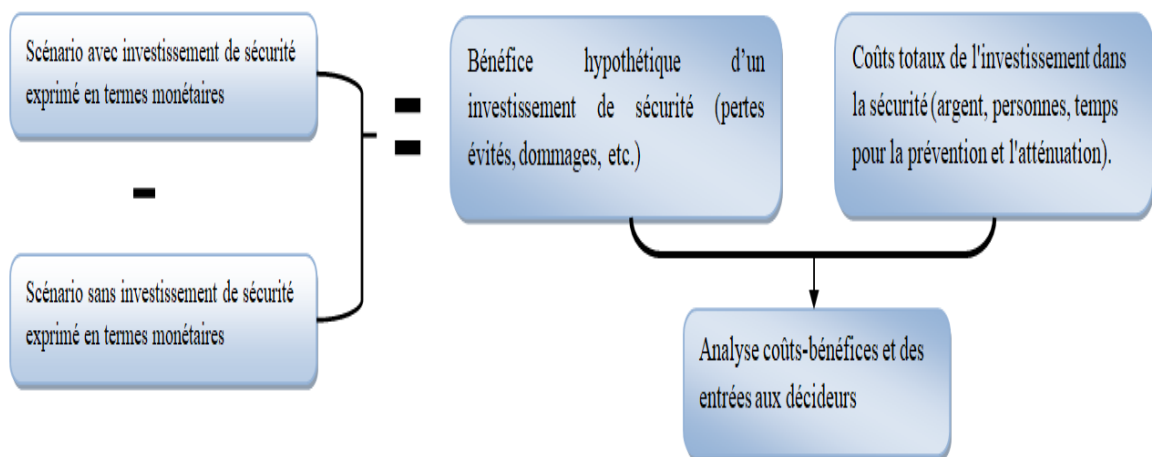


Figure 2.7: Approche de l'ACB pour les investissements en matière de sécurité [17].

Selon [11], les étapes de l'approche ACB peuvent être représentées par la figure 2.8.

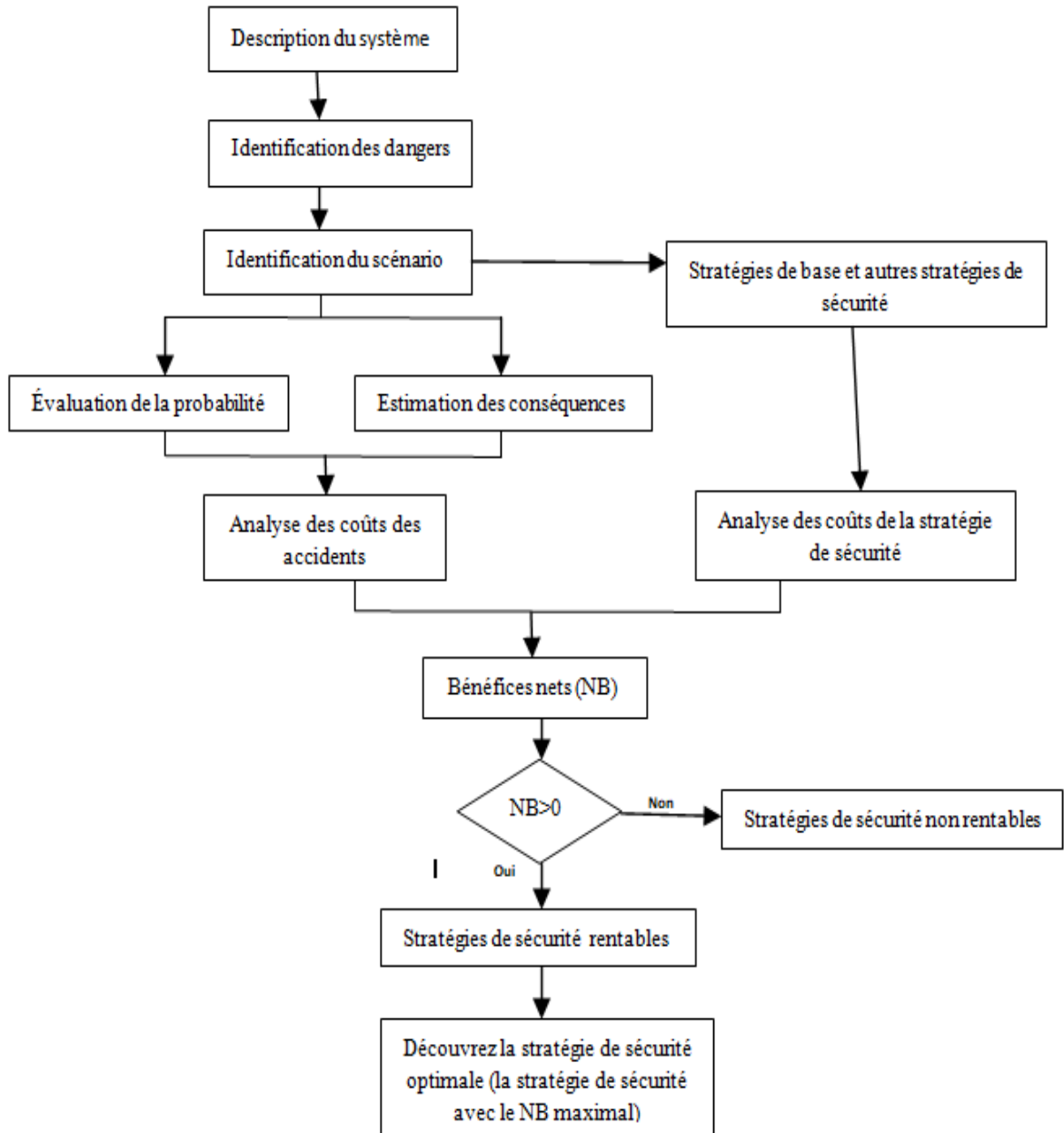


Figure 2.8: Organigramme de l'approche ACB [11].

2.7.5 Évaluation des coûts et des bénéfices

Comme nous l'avons déjà mentionné, un projet de sécurité peut être vu comme un processus de transformation d'inputs (coûts) en outputs (bénéfices). Les inputs et outputs sont considérés comme conséquences du projet, entrant dans l'une des catégories suivantes (voir figure 2.9) :

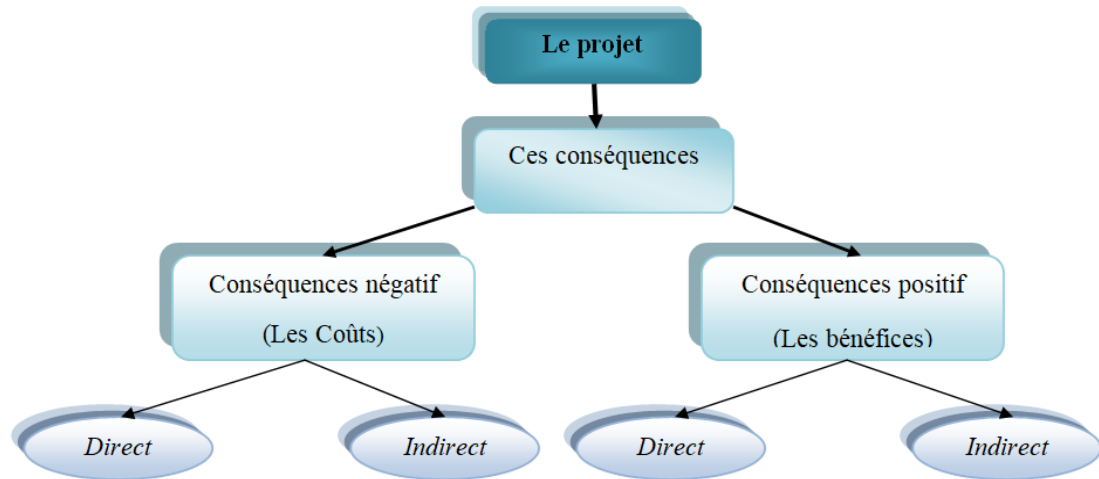


Figure 2.9: Catégories des conséquences d'un projet

À travers les différentes définitions des coûts et des bénéfices trouvés dans la littérature économique, les définitions suivantes sont appropriées à notre domaine de recherche :

- ✓ **Bénéfice** : le rendement reçu suite à l'investissement d'une somme d'argent dans une entreprise pendant une période donnée.
 - **Bénéfice direct** : la rentabilité souhaitée pour lequel le projet a été créé, c'est-à-dire l'objectif principal du projet.
 - **Bénéfice indirect** : tout avantage supplémentaire que le projet entraîne, comme l'amélioration de l'image de l'entreprise.
- ✓ **Coûts** : le prix, qui est l'ensemble des charges supportées par l'entreprise, l'établissement, l'homme, etc., pendant toute la durée du processus d'un projet.
 - **Coût direct** : la somme des coûts directement liés au projet, ce qui signifie qu'ils sont clairement liés au projet, tels que le capital du projet et les salaires de la main-d'œuvre.
 - **Coût indirect** : la somme des coûts qui sont indirectement liés au projet mais qui sont nécessaires pour son achèvement, comme le coût de perte de production relative à la phase de l'installation du projet ou à la nature du projet.

L'ACB tente de donner une valeur monétaire de toutes les conséquences positives et négatives pour faciliter leur comparaison. La définition de la valeur des conséquences positives ou les inputs est plus facile que celle de la valeur des conséquences négatives ou les outputs, car elles ne possèdent pas toujours de valeur marchande.

Les notions de « coût » et « bénéfice » dans un contexte de projet sont beaucoup plus larges et complexes et relatives à la nature du projet, au cycle de vie et au point de vue (chef de

projet, gestionnaire, ...). La position que nous adoptons dans cette étude est celle d'analyste de sécurité ou de risques, où :

- Le coût est celui de l'investissement dans la réduction de risque d'un accident. Autrement dit, le coût associé aux mesures de sécurité (barrières de sécurité) utilisées dans cet investissement à partir du début de projet jusqu'à sa fin, en considérant toutes les phases de vie des mesures de sécurité, tels que : le coût d'achat et toutes ses exigences (le coût de la formation, le coût de la mise en place, le coût de maintenance, le coût d'exploitation et le coût des défaillances intempestives).
- Les bénéfices d'un projet d'investissement de la sécurité égale à l'objectif de ce projet : gain en termes de coût d'accident ou de dommages évités (les effets négatifs engendrés sur les travailleurs, la population, l'environnement et les biens). Pour déterminer les dommages, on identifie les zones menacées par l'accident et le degré de cette menace afin de connaître les éléments vulnérables existants dans ces zones et donc le potentiel des pertes attendues.

Les bénéfices comme les coûts peuvent être exprimés en termes mathématiques et monétaires, mais la difficulté réside dans la nature des bénéfices ou avantages. Nous détaillerons ces deux paramètres dans le chapitre 3 de ce manuscrit.

2.7.6 Analyse coût-efficacité

L'analyse coût-efficacité (ACE) est une méthode d'analyse et d'évaluation des projets et des décisions. Elle est considérée comme une forme particulière de l'ACB [25]. L'ACB est un outil mettant en avant les bénéfices escomptés d'un projet, d'une stratégie ou d'une politique en les comparant aux coûts liés à sa mise en œuvre, alors que l'ACE permet de décider d'un ensemble de mesures afin d'atteindre un objectif prédéterminé à moindre coût [35]. Donc on peut dire que l'ACE s'agit d'une méthode de recherche qui caractérise les coûts d'un investissement par rapport au montant des bénéfices qu'il rapporte. Elle fournit des moyens normalisés pour comparer les investissements afin d'identifier ceux qui produisent un effet positif maximal par unité de coût supplémentaire. Dans l'ACE, il s'agit de fixer un objectif et de minimiser les coûts pour l'atteindre. Avec la même approche, on peut chercher à maximiser l'objectif de prévention, par exemple le nombre de vies sauvées, pour un budget donné [25]. Ce problème d'optimisation visant à déterminer la combinaison optimale d'investissements (mesures) de sécurité est similaire à la résolution du problème dit du « sac à dos » [37].

En fait, les entreprises ne peuvent pas mettre en œuvre toutes les mesures de sécurité qui sont efficaces ou qui ont passé les tests de l'analyse coûts-bénéfices, parce qu'elles sont confrontées à des contraintes budgétaires (le choix est lié aux limites du cadre budgétaire). La combinaison optimale de mesures de sécurité peut être déterminée par une analyse coût-efficacité, et peut être traduite par l'équation mathématique suivante sous réserve de contraintes [37] :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Max } B_i x_i \\ C_i x_i \leq B_U \\ x_i \in \{0,1\} \end{array} \right. \quad (2.3)$$

Cette équation peut se traduire comme suit [30]. La première ligne exprime le bénéfice global du portefeuille d'investissements de sécurité choisis. La deuxième ligne (première contrainte) exprime le coût global des mesures choisies, qui ne doit pas être supérieur au budget de sécurité (B_U). La dernière ligne (deuxième contrainte) exprime le fait que la mesure est soit entièrement prise, ne soit pas prise du tout. Dans les limites du budget de sécurité, le résultat du modèle est la combinaison la plus avantageuse des mesures de sécurité x_i pour chaque scénario j .

2.7.7 Indicateurs financiers (VAN, RAC)

Les indicateurs financiers sont des critères d'évaluation des projets qui sont utilisés dans des circonstances futures sûres, ce qui signifie que les coûts et les bénéfices futurs des projets d'investissement sont connus. L'avantage net peut être mesuré en termes absolus par la valeur actuelle nette, ou en termes relatifs par le rapport bénéfices-coûts :

- La valeur actuelle nette (VAN ou NPV : *Net Present Value*) d'un projet est la valeur actuelle des avantages estimés moins les coûts : elle peut s'interpréter comme la quantité de dommages évités et donc économisés par la société, déduction faite des coûts, grâce à l'investissement réalisé [33]. Elle peut être exprimée par l'équation suivante :

$$VAN = \sum_{t=0}^n \frac{B_t}{(1+r)^t} - \sum_{t=0}^n \frac{C_t}{(1+r)^t} \quad (2.4)$$

Avec : B_t représente les bénéfices de l'année t , C_t désigne les coûts de cette même année, n est la durée de vie du projet et r décrit taux d'actualisation.

- Le rapport bénéfices-coûts (RAC) d'un projet est la valeur actuelle des estimés avantages divisés par la valeur actuelle des coûts estimés : ce rapport peut s'interprété

comme la quantité de dommage évités pour un euro (unité monétaire) investi dans le projet [33]. Il est exprimé par l'équation suivante :

$$RAC = \frac{\sum_{t=0}^n \frac{B_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=0}^n \frac{C_t}{(1+r)^t}} \quad (2.5)$$

L'investissement est considéré comme rentable, s'il présente une $VAN > 0$ ou un $RAC > 1$.

- $RAC > 1 \rightarrow VAN$ positive.
- $RAC < 1 \rightarrow VAN$ négative.
- $RAC = 1 \rightarrow VAN$ nulle.

Le RAC est un indicateur pertinent si les différents scénarios ne sont pas concurrents.

- **Exemple** : considérons deux projets.

- *Le premier projet* :

$$B_1 = 3.5 \text{ M €}, C_1 = 1 \text{ M €}, VAN_1 = 3.5 - 1 = 2.5 \text{ M €}, RAC_1 = \frac{3.5}{1} = 3.5 \text{ M €}.$$

- *Le deuxième projet* :

$$B_2 = 6 \text{ M €}, C_2 = 2 \text{ M €}, VAN_2 = 6 - 2 = 4 \text{ M €}, RAC_2 = \frac{6}{2} = 3 \text{ M €}.$$

Nous avons donc : $VAN_2 > VAN_1$ et $RAC_1 > RAC_2$. Dans ce cas de figure, l'utilisation du RAC pour la comparaison entre les deux projets est non pertinente.

2.8 Notions liées à l'ACB

2.8.1 Taux d'actualisation

L'actualisation est un procédé consistant à déterminer la valeur d'aujourd'hui de flux financiers qui seront payés ou reçus dans le futur (l'inverse de la capitalisation).

Le commissariat général au plan (CGP) [38] définit l'actualisation de la manière suivante : *c'est l'opération mathématique qui permet de comparer des valeurs économiques qui s'échelonnent dans le temps, il s'agit de ramener la valeur future d'un bien, d'une dépense à une valeur actuelle, ...* Le taux d'actualisation est un taux de substitution entre le futur et le présent, il traduit la valeur du temps pour une entreprise ou une collectivité : « *c'est en quelque sorte le prix du temps* ».

L'actualisation est l'interface qui représente l'influence des différents facteurs sur la valeur de l'argent, tels que :

- L'inflation (un euro dans 5 ans permettra d'acheter un nombre inférieur de biens et par conséquent aura une valeur inférieure à un euro d'argent),

- Le coût du temps lui-même, ce coût est matérialisé en finance par le taux d'intérêt.

La figure 2.10 rend compte du processus d'actualisation des flux. Par ailleurs, la valeur actualisée des flux donnée est fournie par la relation (2.6).

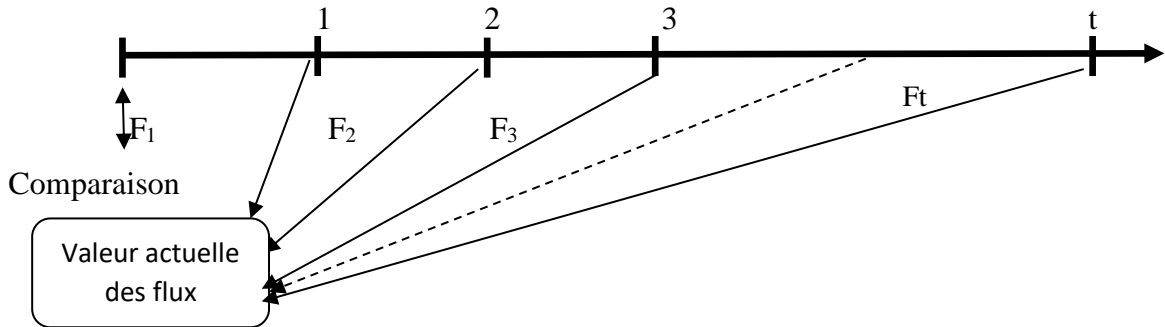


Figure 2.10: Actualisation des flux.

$$\dot{F}_t = \frac{F_t}{(1+r)^t} \tag{2.6}$$

Où : \dot{F}_t est le flux actualisé, F_t désigne le flux de l'année t .

La CGP [38] propose la formule suivante pour déterminer le taux d'actualisation r :

$$r = \begin{cases} 0.04 & , t \leq 30 \\ \sqrt[3]{1.04^{30} \cdot 1.02^{t-30}} - 1, & t > 30 \end{cases} \tag{2.7}$$

Cette proposition facilite la transition sans rupture du taux constant de 4% durant les trente premières années au taux décroissant à partir de la trentième année. Ce dernier décroît régulièrement à partir de 4% pour atteindre environ 3% à un horizon de 100 ans et converge enfin vers 2% pour des horizons très éloignés. Le tableau suivant détermine l'impact de l'actualisation sur les valeurs économiques de la future.

Tableau 2.4: Impact de l'actualisation sur les valeurs économiques du futur [38].

	Valeur actualisée d'un million d'euro		
	30 ans	100 ans	500 ans
r = 2%	552000	138000	19000
r = 4%	308000	20000	400

Le taux d'actualisation est un élément important dans l'ACB. Il est représentatif du poids que l'on donne aux conséquences futures du projet. Plus ce taux est élevé, moins les conséquences futures prennent d'importance dans l'analyse. Généralement, le taux préconisé pour les études ACB est de 4%, décroissant jusqu'à 2% lorsque le projet porte sur

les durées très longues (plus de 30 ans) [29]. Selon Health and Safety Executive (HSE) [39], le taux d'actualisation :

- Ne doit pas être déduit les avantages futurs à des taux supérieurs à 1,5%.
- Doit être déduit les coûts futurs avec un taux d'au moins 3.5%.

- **Remarque :** le taux d'actualisation est un taux d'intérêt général.

2.8.2 Horizon Temporel

L'horizon temporel correspond à la durée sur laquelle sont considérés les flux de coûts et de bénéfices associés au projet. Il est parfois désigné par le terme « *durée de vie du projet* » [40].

La définition d'un horizon temporel pour un investissement dépend généralement des objectifs de l'investisseur. Il ne devrait jamais dépasser la période de rentabilité économique du projet. L'horizon de planification d'un projet peut s'étendre sur un an, cinq ans, vingt-cinq ans ou plus, selon le projet. Le choix de ce temps est extrêmement déterminant dans l'évaluation des couts et des bénéfices du projet.

Le tableau suivant représente les horizons temporels, conseillés par (l'OCDE) [29], pour des projets d'investissement dans de différents secteurs d'activités sur la période 2007-2013.

Tableau 2.5:Horizons temporels conseillés pour des projets dans différents secteurs [29]

Projet par secteur	Perspective moyenne
Énergie	25
Eau et environnement	30
Chemins de fer	30
Routes	25
Ports et aéroports	25
Télécommunication	15
Industrie	10
Autres services	15

2.8.3 Valeur statistique d'une vie (VSV)

Les projets d'investissement, comme mentionné auparavant, visent à créer un intérêt : des avantages supérieurs aux coûts. Les coûts sont généralement faciles à déterminer, mais comment évaluer les bénéfices liés à la sauvegarde de vies humaines ? À cet effet, il est primordial de déterminer une valeur monétaire de vies sauvées pour diminuer les risques sur les vies. La valeur utilisée pour quantifier l'avantage d'éviter un décès est également

appelée : *coût de vie, valeur de la prévention d'un décès (VPF : Value of Preventing a Fatality) et coût implicite de la prévention d'un décès (ICAF : Implied Cost of Averting a Fatality)*. Dans la littérature plus récente, la valeur d'une vie humaine utilisée dans l'ACB est appelée la valeur de sauver une vie statistique (VOSL : *Value of Statistical Life*) plutôt que la valeur statistique d'une vie humaine (VSV) [13].

La VSV se calcule par la somme d'argent qu'une société est prête à payer pour réduire l'exposition au risque de chacun de ses membres. Il est important de noter que la VSV n'est pas une mesure de la valeur d'une vie humaine, mais plutôt de la valeur pour un individu d'une réduction marginale de sa probabilité d'accident mortel [29] : *la valeur d'une fatalité évitée*. Aussi, la VSV ne repose pas sur la valeur certaine d'un décès, mais bien sur la valeur d'une petite variation du risque de décès [41].

Parmi les principales méthodes utilisées pour déterminer la valeur VSV, on trouve [42] :

- ✓ L'approche du *capital humain* qui associe la valeur de la vie humaine à sa contribution économique au bien-être de la société. Dans cette approche, on trouve la définition de Dublin et Lotka [43], qui définissent la valeur d'une vie humaine comme étant la valeur actualisée des revenus nets futurs d'un individu. Cette approche dit directement que le chanteur et le joueur de football offrent à la communauté plus que le médecin et l'enseignant.
- ✓ L'approche de la *disposition à payer (DAP)*. Cette approche se base sur la volonté à payer d'un individu pour réduire son risque de décès. L'opposé est la disposition à accepter un certain montant (prime salariale) pour voir son espérance de vie diminuer (exposition au risque d'accident du travail). Comme dit le Pen [44] : en effet la plupart des personnes seraient disposées à payer un certain montant pour bénéficier de ces années supplémentaires. La DAP est l'approche la plus utilisée pour déterminer la VSV.

D'une manière très simplifiée, nous pouvons nous appuyer sur la relation suivante pour calculer la VSV selon l'approche DAP [29].

$$VSV = \frac{CAP}{R} \quad (2.8)$$

Avec : *CAP* est le consentement à payer d'un individu pour une réduction *R* de la probabilité de décès.

✓ *Exemples :*

- *CAP* = 2000 € pour réduire de 5/10000 à 1/10000 la probabilité de décès.

$$VSV = \frac{2000}{0.0004} = 5M€$$

- Une société composée de 1 millions de personnes qui envisagent de financer un projet public de sécurité [42]. Supposons que ces personnes sont prêtes à payer 100 dollars (CAP) en moyenne pour réduire la probabilité de décès de 3/100000 à 1/100000, ce qui correspond à 20 vies pour cette société. La disposition à payer pour sauver ces 20 vies est de 100 millions de dollars. Cela équivaut à 5 millions de dollars par vie sauvée (VSV).

Remarque :

- Les études européennes estiment la valeur statistique de la vie à environ 120 fois le PIB (le produit intérieur brut) donc à 2,5 M€ en France [45].
- La direction environnement de la commission Européenne recommandait en 2000 une valeur de vie statistique comprise entre 1 et 3.5 M€.
- Les VSV utilisées par différentes agences de régulation américaines sont comprises entre 1 et 6 millions \$ [46].
- Les VSV généralement utilisées dans l'ACB sont largement supérieures à celles généralement constatées pour la compensation d'un accident (accident mortel au travail, accident de la route) [29].
- Les projets d'investissement de sécurité sont des projets qui créent des bénéfices en termes de vies sauvées, c'est-à-dire en termes de baisses de mortalité, mais aussi il y a une partie des bénéfices relative à l'amélioration de la santé. Par exemple, en France, le rapport Boiteux (2001) [45] préconise d'adopter un ajustement de la VSV pour tenir compte des effets sur la santé : 2.2% de la VSV pour les blessés légers et 15% de la VSV pour les blessés graves.

2.9 Conclusion

Dans ce chapitre, des concepts de base issus de la théorie économique sont présentés. Ces concepts servent dans l'évaluation des projets d'investissements dans le domaine de la sécurité. D'abord, le projet d'investissement a été clairement défini. Puis, la notion de cycle de vie a été introduite et le coût de la sécurité a été discuté. Ensuite, le principe ALARP a été présenté et son objet a clairement été identifié. Finalement, l'approche ACB a été étalée en termes de définitions objectifs, étapes et notions attachées. En effet, il a été montré que L'ACB occupe une place cruciale dans le processus de décision et permet d'alimenter le concept ALARP en informations nécessaires. Par ailleurs, la VSV qui est une notion très importante liée à l'ACB dans le domaine de la sécurité a été décrite.

Le prochain chapitre détaille les différentes formulations analytiques permettant l'estimation des différents coûts et bénéfices utilisés dans le processus ACB.

Références du chapitre 02 :

- [1] Guide, A. (2001). Project management body of knowledge (pmbok® guide). In Project Management Institute (Vol. 11, pp. 7-8).
- [2] Ossoro, M. T. (2014). Évaluation des retombées économiques des projets énergétiques au Québec : analyse coûts-avantages de la mini-centrale hydroélectrique de Val-Jalbert (Doctoral dissertation, Université du Québec à Chicoutimi).
- [3] Corriveau, G. (1996). Conceptualisation d'une logique du désordre constructif en gestion de projet : fondements, modélisation et hypothèses (Doctoral dissertation, Aix-Marseille 3).
- [4] Mbaye, A. A. (2012). Analyse des projets dans les pays en développement : guide pratique de l'évaluateur. Presses universitaires de Dakar.
- [5] Rekik, L. (2010). {Analyse} des investissements. Télé-Universitié, Université du Québec à Montréal.
- [6] Thauvron, A. (2003). Les choix d'investissement. E-theque.
- [7] Patel, M. B., & Morris, P. W. G. (1999). Guide to the Project Management Body of Knowledge. Centre for Research in the Management of Projects. Centre for Research in the Management of Projects (CRMP). University of Manchester, UK.
- [8] Archibald, R. D. (2003). Managing high-technology programs and projects. John Wiley & Sons.
- [9] Fumey, M. (2001). Méthode d'évaluation des risques agrégés : application au choix des investissements de renouvellement d'installations (Doctoral dissertation).
- [10] ISO/CEI Guide 51 (1999). Aspects liés à la sécurité : Principes directeurs pour les inclure dans les normes. Organisation internationale de normalisation (ISO).
- [11] Chen, C., Reniers, G., Khakzad, N., & Yang, M. (2021). Operational safety economics: Foundations, current approaches and paths for future research. Safety science, 141, 105326.
- [12] Spengler, J. J. (1968). The economics of safety. Law & Contemp. Probs., 33, 619.
- [13] Ale, B. J. M., Hartford, D. N. D., & Slater, D. (2015). ALARP and CBA all in the same game. Safety science, 76, 90-100
- [14] Baybutt, P. (2014). The ALARP principle in process safety. Process Safety Progress, 33(1), 36-40.

- [15] Department for Transport. (2012). A valuation of road accidents and casualties in Great Britain in 2012. Reported Road Casualties in Great Britain: Annual Report. Retrieved from <https://www.gov.uk/government/publications/reported-road-casualties-great-britain-annual-report-2012>
- [16] IEC 61511 (2016), Functional Safety – Safety Instrumented Systems for the Process Industry Sector, 2nd ed., International Standard, Geneva.
- [17] Reniers, G., Talarico, L., & Paltrinieri, N. (2016). Cost-benefit analysis of safety measures. In Dynamic risk analysis in the chemical and petroleum industry (pp. 195-205). Butterworth-Heinemann.
- [18] IEC 61508 (2010), Functional Safety of Electrical/electronic/programmable Electronic Safety Related Systems, 2nd ed., IEC 61508 Standard, Geneva.
- [19] Nesticò, A., He, S., De Mare, G., Benintendi, R., & Maselli, G. (2018). The ALARP principle in the cost-benefit analysis for the acceptability of investment risk. Sustainability, 10(12), 4668.
- [20] Health and Safety Executive. (2022, July 18). ALARP "at a glance". tiré de <https://www.hse.gov.uk/enforce/expert/alarpglance.htm>.
- [21] Aven, T., Vinnem, J. E., & Wiencke, H. S. (2007). A decision framework for risk management, with application to the offshore oil and gas industry. Reliability Engineering & System Safety, 92(4), 433-448.
- [22] Aven, T. (2011). Quantitative risk assessment: the scientific platform. Cambridge university press.
- [23] Norway, S. (2010). NORSOK-Z-013-Risk and emergency preparedness assessment.
- [24] Sandmo, A. (2011). Economics evolving: A history of economic thought. Princeton University Press.
- [25] Treich, N. (2005). L'analyse coût-bénéfice de la prévention des risques. LERNA-INRA, Université de Toulouse.
- [26] Reniers, G., & Brijs, T. (2014). Major accident management in the process industry: An expert tool called CESMA for intelligent allocation of prevention investments. Process safety and environmental protection, 92(6), 779-788.
- [27] Dixon, J. A., & Hufschmidt, M. M. (1986). Economic evaluation techniques for the environment.

- [28] Saarikoski, H., Mustajoki, J., Barton, D. N., Geneletti, D., Langemeyer, J., Gomez-Baggethun, E., ...& Santos, R. (2016). Multi-Criteria Decision Analysis and Cost-Benefit Analysis: Comparing alternative frameworks for integrated valuation of ecosystem services. *Ecosystem services*, 22, 238-249.
- [29] Meunier, V., & Marsden, É. (2009). *Analyse coût-bénéfices : guide méthodologique*. FonCSI.
- [30] Villa, V., Reniers, G. L., Paltrinieri, N., & Cozzani, V. (2017). Development of an economic model for the allocation of preventive security measures against environmental and ecological terrorism in chemical facilities. *Process Safety and Environmental Protection*, 109, 311-339.
- [31] HSE, R. R. (2001). *Reducing Risks, Protecting People*. HSE's decision-making process. Crown, London. HSE Books. ISBN 0 7176 2151 0
- [32] Franks, A. (2002). *Application of QRA in operational safety issues*. HSE Books.
- [33] Doligé, É. (2011). *L'ACB (analyse coût/bénéfice) : une aide à la décision au service de la gestion des inondations*. Guide à l'usage des maîtres d'ouvrage et de leurs partenaires. Centre Européen de Prévention du Risque d'Inondation (CEPRI).
- [34] Olivier, V. (2014). *Guide Simplifié pour une Analyse Coûts-Avantages des Projets d'Adaptation au Changement Climatique au niveau local*. NEF – New Economics Foundation.
- [35] Economie Eau France. (2017). Fiche de compréhension de la méthode de l'analyse coûts-bénéfices. Tiré de https://economie.eaufrance.fr/sites/default/files/2020/12/ACB_pdf.pdf.
- [36] Reniers, G., & Brijs, T. (2013). A tool for intelligent budget allocation of prevention measures related to major accidents. *Safety and Security Engineering V*, 134, 3.
- [37] Reniers, G., & Sørensen, K. (2013). Optimal allocation of safety and security resources. *Chemical engineering transactions*, 31, 397-402.
- [38] Général du Plan, C. (2005). *Révision du taux d'actualisation des investissements publics*. Présidé par D. Lebegue, La Documentation Française.
- [39] Health and Safety Executive. (2022, July 18). ALARP "check". tiré de www.hse.gov.uk/enforce/expert/alarpcheck.htm.
- [40] Erdlenbruch, K., Gilbert, É., Grelot, F., & Lescoulier, C. (2008). Une analyse coût-bénéfice spatialisée de la protection contre des inondations. Application de la méthode des dommages évités à la basse vallée de l'Orb. *Ingénieries Eau-Agriculture-Territoires*, (53), p3.

- [41] Viscusi, W. K. (2005). The Value of Life. John M. Olin Center for Law, Economics, and Business, Harvard Law School Cambridge. Discussion Paper, (517), 06.
- [42] Dionne, G., & Lebeau, M. (2010). Le calcul de la valeur statistique d'une vie humaine. *L'Actualité économique*, 86(4), 487-530
- [43] Dublin, L. I., Lotka, A. J., & Spiegelman, M. (1947). The money value of a man. The Ronald press company.
- [44] Le Pen, C. (1993). Capital humain et la santé (valeur et qualité de la vie humaine). Paris, Dauphine, miméo
- [45] France. Commissariat général du plan, Boiteux, M., & Baumstark, L. (2001). Transports : choix des investissements et coût des nuisances (p. 325). La documentation française.
- [46] Viscusi, W. K., & Aldy, J. E. (2003). The value of a statistical life: a critical review of market estimates throughout the world. *Journal of risk and uncertainty*, 27, 5-76.

Chapitre 03 :

**Formulation mathématique
des différents éléments liée à
l'ACB**

3.1 Introduction

L'analyse coûts-bénéfices (ACB) et l'analyse coût-efficacité (ACE) sont deux méthodes économiques importantes pour choisir les projets de sécurité les plus performants. La méthode ACB s'appuie sur deux facteurs principaux, à savoir le coût et le bénéfice, en plus d'un facteur de disproportion disproportionné, pour prouver que les risques sont ALARP. L'objet de ce troisième chapitre est d'expliquer ces paramètres d'une manière détaillée, en termes conceptuel et d'expressions mathématiques.

3.2 Les coûts d'une barrière de sécurité

Chaque projet a un cycle de vie et un coût lié à ce cycle de vie, appelé « *coût du cycle de vie* » (LCC : *Life Cycle Cost*). Il est défini selon la norme NF EN 60300-3-3[1] de la manière suivante : « *Le coût cumulé d'un produit tout au long de son cycle de vie* », et selon la norme ISO 15663-3[2] : « *Total cumulé actualisé de tous les coûts engagés par une fonction ou un équipement spécifié au cours de son cycle de vie* ». L'origine du concept LCC appartient au ministère de la Défense des États-Unis.

Pour calculer le LCC d'un produit (ou projet), il est nécessaire de connaître parfaitement la vie du produit (dans notre cas, mesure ou barrière de sécurité) et de décrire le cycle de vie correspondant afin d'identifier l'ensemble des coûts associés aux différentes phases ou éléments. La définition du cycle de vie varie d'un champ à l'autre (biologique, commercial, industriel, ...). Cependant, toutes les définitions s'accordent à dire qu'il existe une série d'étapes ou phases, où chaque étape a ses propres caractéristiques et avantages. Le cycle de vie est défini selon la norme ISO 15663-3 [2] ainsi : « *cycle qui comprend toutes les étapes de développement, depuis le début de l'étude jusqu'à l'élimination d'un équipement ou d'une fonction* ».

Le LCC est une technique qui encourage ceux qui sont responsables de la sélection d'un système à considérer tous les coûts encourus au cours de la durée de vie d'un système plutôt que les seuls coûts d'achat [3]. L'évaluation du LCC consiste à analyser puis à chiffrer de façon prévisionnelle l'ensemble des coûts liés à une mesure de sécurité pendant toutes les phases de son cycle de vie. Dans le cadre de la sécurité industrielle, le coût de l'investissement dans la réduction du risque d'accident présente le coût associé aux mesures de sécurité utilisées dans cet investissement, depuis le début du projet jusqu'à sa fin en passant par toutes les étapes de la vie de la mesure de sécurité.

Les performances de sûreté de fonctionnement (fiabilité, maintenabilité, disponibilité et sécurité) influencent directement sur le coût d'un système pendant ses phases d'utilisation. Par ailleurs, l'augmentation du prix d'obtention de la mesure amène souvent à l'amélioration de sa performance [1]. Donc, le calcul du LCC est essentiel au succès de la mise en œuvre du n'importe quel système de sécurité et présente une partie importante de l'application du principe ALARP pour attendre un niveau de sécurité jugé tolérable.

Le cycle de vie des systèmes de sécurité en général se divisé en deux parties : *la phase de construction* et *la phase d'exploitation*. Notons qu'un certain chevauchement entre ces deux phases peut exister.

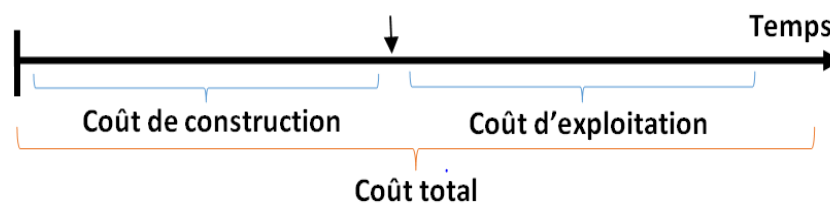


Figure 3.1: Les catégories des coûts de cycle de vie

3.2.1 Estimation des coûts

Dans les décisions liées à des investissements en sécurité sur une installation industrielle, il est important de comptabiliser uniquement les coûts liés à l'investissement de sécurité et d'éviter tous les coûts qui ne sont pas imputables à la mesure étudiée. Alors l'intérêt principal du domaine HSE dans l'ACB est de s'assurer que tous les coûts appropriés ont été inclus. A ce titre, les étapes proposées suivantes sont à suivre [4 ; 5] :

1. Ne considérer que les coûts nécessaires et suffisants aux fins de la mise en œuvre de la mesure de réduction des risques (pas de placage ou de mesure de luxe).
2. Commencer à calculer les coûts initiaux du projet, qui sont les coûts liés à la conception jusqu'à la mise en service du projet.
3. Il est convenable d'inclure les coûts d'installation, d'exploitation, de formation, et de maintenance supplémentaire induite.
4. Intégrer les pertes de production qui seraient induites par l'arrêt ou le fonctionnement au ralenti de l'unité (et des autres unités directement dépendantes) causé par la mesure.
5. Lorsqu'une perte de production peut s'assimiler à un report de la production (c'est-à-dire que la durée d'exploitation de l'unité est contrainte par un temps d'exploitation et non par une durée calendaire), seuls les intérêts sur la perte de production devraient

être listés comme conséquence. S'agissant par exemple d'un puits de pétrole, le report de production lié à un arrêt temporaire pour travaux ne devrait pas être compté comme perte de production.

6. Lorsque les pertes de production sont un facteur important dans la décision finale, il sera opportun de démontrer que ces pertes seraient aussi importantes si les travaux étaient programmés lors d'une période d'arrêt planifiée (grand arrêt, par exemple).
7. Si la mesure de réduction de risque induit également des économies de fonctionnement (coûts d'exploitation réduits, maintenance réduite par exemple), ces économies devraient être soustraites des coûts.
8. Tous les coûts réclamés doivent être ceux encourus par le titulaire de droits (les coûts encourus par d'autres parties, par exemple les membres du public ne doivent pas être pris en compte).
9. Il doit être prouvé que les frais réclamés ne concernent que la mesure mise en œuvre (la mesure de sécurité).
10. La traduction en coûts monétaires est souvent incertaine et doit être justifiée.

Les *économies des coûts* sont un ensemble des actions ou des politiques qui réduisent le coût attendu d'une transaction donnée. Ce sont des mesures mises en œuvre pour réduire le montant d'argent payé pour un certain bien ou service et également tous les bénéfices qui ne sont pas considérées comme des bénéfices de sécurité.

Comme nous l'avons dit précédemment, le LCC est fondamental pour la mise en œuvre réussie d'un système de sécurité et aide à adopter le meilleur choix, ainsi que la répartition optimale des ressources financières pour atteindre l'objectif souhait. Le premier modèle spécifiquement développé pour les systèmes de sécurité des procédés est celui de Lydersen et Aaru [6] :

$$LCC = LAC + LSC + LUC \quad (3.1)$$

Avec :

- LAC (*Life Acquisition Cost*) : coût d'acquisition, qui comporte les coûts de l'équipement, conception, installation et mise en service.
- LSC (*Life Support Cost*) : coût de la phase d'exploitation, qui comporte les coûts d'exploitation proprement dit et de maintenance, y compris leur coût annuel pendant toute la durée de vie opérationnelle.
- LUC (*Life Unavailability Cost*) : coût d'indisponibilité. Généralement ceux relatifs aux pertes de production induites par la mesure de sécurité, dues par exemple aux déclenchements intempestifs.

On retrouve également le modèle proposé par Goble [7] pour les systèmes instrumentés de sécurité (SIS), où les coûts sont divisés en deux principales catégories : les coûts d’approvisionnement et les coûts d’exploitation. De plus, Martorell et al [8] ont présenté des modèles importants pour le calcul du coût d’exploitation, en tenant compte de la stratégie de test et de maintenance et aussi du coût des arrêts et du coût de réparation du système. Torres [9] a suggéré un autre modèle pour calculer le LCC basé sur le travail de Goble [7] où le coût est divisé en : cout d’approvisionnement, d’exploitation et de risque.

Nous pouvons également trouver des études axées sur l’ACB en tant que méthode importante pour prendre des décisions liées aux investissements dans la sécurité, contenant des modèles d’estimation des coûts et bénéfices. Cela inclut par exemple l’étude menée dans [10], qui se référerait au domaine de la sécurité des procédés, où le coût est divisé en six catégories, et aussi l’étude menée dans [11] qui s’est concentrée sur les effets dominos dans les zones industrielles chimiques et leur gestion à travers une analyse coûts-bénéfices. En outre, un modèle économique a été développé dans [12] pour l’allocation des mesures de sécurité. L’un des modèles les plus importants qui donne une vue claire des différents types des coûts, pouvant être appliqué dans le domaine de la sécurité, est celui proposé par Reniers et al. [13 ; 14]. Les différentes catégories de coûts proposées dans ce modelé sont données au tableau 3.1. Ces catégories peuvent être divisées en coûts directs et coûts indirects, comme le montre la figure 3.2.

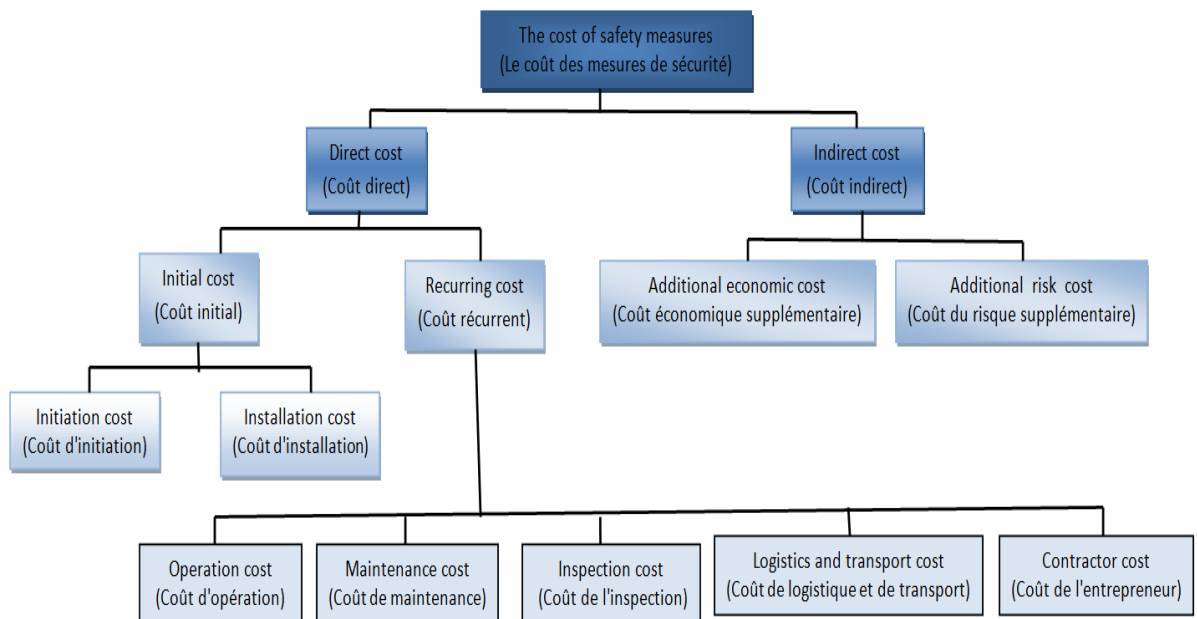


Figure 3.2: Composantes des coûts des mesures de sécurité [15].

Tableau 3.1: Catégories de coût des mesures de sécurité [13 ; 14].

Catégorie	Sous-catégorie
Initial costs	Investigation Selection and design Material Training Changing guidelines and informing team
Installation costs	Production loss Start-up Equipment Installation
Operating costs	Utilities
Maintenance costs	Material Maintenance team Production loss Start-up
Inspection costs	Inspection team
Logistics and transport safety costs	Transport of hazmat Storage of hazmat Drafting of control lists Safety documents
Contractor safety costs	Team selection Training
Other safety costs	Other safety costs

3.2.2 Le modèle d'estimation des coûts

Sur la base des références précédentes [3 ; 6 ; 7 ; 9 ; 12 ;13 ;14 ; 15], nous clarifions les coûts les plus importants dans le cycle de vie des barrières de sécurité, qui doivent être adaptés selon le type de barrière.

3.2.2.1 Le coût de construction (C_{Cons})

La période de construction est la période pendant laquelle sont réalisées les constructions du projet nécessaires à son exploitation. Cette période est très souvent caractérisée par de lourd investissement : *coût en capital initial*. Il représente la somme des coûts suivants : coût de design (conception), d'achat, d'installation, de démarrage et le coût de formation (s'il existe à cette phase). Le coût de construction peut alors être exprimé par la formule suivante :

$$C_{Cons} = C_{DS} + C_A + C_{inst} + C_{dm} + C_f \quad (3.2)$$

- **Coût de design (C_{DS}).** Coût des premières étapes : conception détaillée, gestion du programme, configuration du système, vérification des tests de sécurité et les logiciels, etc. Il peut être donné de façon globale (coût de conception global), calculé en multipliant le nombre d'heures de travail dans la conception par les salaires horaires de tous les employés participants :

$$CDS = \sum_{i=1}^k s_i \cdot h_i \cdot n_i \quad (3.3)$$

Avec :

- i : la catégorie des employés.
- k : le nombre des catégories d'employés.
- s : le salaire horaire.
- h : le nombre d'heures de travail.
- n : le nombre d'employés.

- **Coût d'achat (C_A)** : tout ce qui a été dépensé pour la marchandise (la mesure de sécurité) : prix d'achat, frais de transport et d'autres frais jusqu'à ce qu'elle atteigne le lieu de l'exploitation (l'entreprise).

$$C_A = P_A + F_A \quad (3.4)$$

$$P_A = \sum_{\forall ij} C_{ij}^a N_{ij} \quad (3.5)$$

Avec :

- P_A : prix d'achat.
- F_A : frais d'achat.
- i : i -ème sous système.
- j : j -ème type de technologie.
- C_{ij}^a : coût d'achat pour le composant ij .
- N_{ij} : nombre des composants ij .

Notons que les frais d'achat comportent les frais de transport en plus des frais déchargements, douane, taxes non remboursables, déchargement, etc.

- **Coût d'installation (C_{inst})**. L'installation selon la définition de la rousse est une action ou manière de placer les appareils en vue d'un usage déterminé. L'installation est une opération globale qui inclut plusieurs sous opérations comme : *montage, tuyauterie, câblage, placement, etc.* Il convient de signaler que le coût d'installation peut être affecté par la conception de l'équipement, par exemple : les petites armoires modulaires sont plus faciles à déplacer et à monter que les grandes armoires. Le coût d'installation peut être représenté par la formule suivante :

$$C_{inst} = \sum_{\forall ij} C_{ij}^{inst} N_{ij} \quad (3.6)$$

Avec :

- i : i -ème sous système.
- j : j -ème type de technologie.
- C_{ij}^{inst} : coût d'installation pour le composant ij .
- N_{ij} : nombre des composants ij .

L'installation d'une barrière de sécurité peut nécessiter l'arrêt temporaire de la production et donc sa perte. Ceci peut être exprimé comme suit :

$$C_{PP} = Q T P \quad (3.7)$$

Avec :

- C_{PP} : coût de la production perdue.
- Q : quantité de production horaire.
- T : durée de l'arrêt de production.
- P : prix unitaire de produit.

Cela dit, le coût d'installation total peut être reformulé ainsi :

$$C_{inst}^{Total} = C_{inst} + C_{PP} \quad (3.8)$$

- **Coût de démarrage (C_{dm})** : le coût de démarrage comprend tous les coûts qui conduisent au démarrage du système global (pour un SIS, l'équipement sous contrôle EUC (*Equipment Under Control*) et la mesure de sécurité). Il inclut les coûts relatifs aux différents tests et vérifications, y compris le coût lié au ralentissement temporaire de la production. Le coût de démarrage peut être représenté par l'équation suivante :

$$C_{dm} = [Q(old) - Q(new)]T' P + C_{oth} \quad (3.9)$$

Avec :

- $Q(old)$: quantité de production horaire avant le ralentissement de la production.
- $Q(new)$: quantité de production horaire après le ralentissement de la production.
- T' : durée entre le moment où la ligne de production est réactivée et le moment de retour à la capacité de production initiale.
- P : prix unitaire de produit.
- C_{oth} : autres coûts.

- **Coût de formation (C_f)** : prix de formation des compétences humaines pour maîtriser le projet et assurer qu'il se déroule comme souhaité. Il peut être représenté par la formule suivante :

$$C_f = \sum_{i=1}^k C_i^f N \quad (3.10)$$

Avec :

- i : type de formation.
- k : nombre de type des formations.
- C_i^f : coût de la formation du type i .
- N : nombre des personnes formées.

3.2.2.2 Le coût d'exploitation (C_{OP})

La période d'exploitation (période de fonctionnement) est très longue. Dans cette période les mesures de sécurité s'exposent à des phénomènes de dégradation et d'usure peu à peu ce qui mène à une perte de la fonction de la mesure de sécurité. De ce fait, il existe de différentes dépenses qui visent à garantir le bon fonctionnement de la mesure et maintenir sa performance au cours du temps. Ces dépenses englobent : les coûts de maintenance (préventive et corrective), les coûts des tests périodiques, le coût de consommation et le coût d'arrêt intempestif. Ces coûts sont estimés sur une base annuelle, ils doivent donc être multipliés par la durée de vie du système. Notons la possibilité d'avoir des formations dans cette phase. Cela dit, le *coût annuel* de la phase d'exploitation peut être exprimé comme suit.

$$C_{OP} = C_{CN} + C_{PM} + C_{CM} + C_T + C_{ST} + C_f \quad (3.11)$$

- **Coût de consommation (C_{CN})** : la valeur monétaire de l'énergie que consomme la mesure de sécurité pour pouvoir accomplir sa fonction et peut être exprimé ainsi :

$$C_{CN} = \sum_{\forall ij} Q_{eij} P_u T_{ij} N_{ij} \quad (3.12)$$

Avec :

i : i -ème sous système.

j : j -ème type de technologie.

Q_{eij} : quantité d'énergie consommée dans une unité de temps pour le composant ij .

P_u : prix unitaire.

T_{ij} : temps de fonctionnement du composant ij sur une année.

N_{ij} : nombre des composants ij .

- **Coût de maintenance.** La norme NF X 60-000 [16] fournit la définition suivante de la maintenance : «*la maintenance est l'ensemble de toutes les actions techniques, administratives et de management durant le cycle de vie d'un bien, destinées à le maintenir ou à le rétablir dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise* ». Le rôle principal de la maintenance est de maximiser le profit que l'on peut tirer d'un investissement. Le processus de maintenance induit des coûts qui peuvent être représentés par l'équation suivante :

$$C_M = C_{mr} + C_{em} + C_{PP'} + C_{dm'} \quad (3.13)$$

Avec :

C_{mr} : coût des matériels remplacés.

C_{em} : coût de l'équipe de maintenance.

$C_{PP'}$: coût de la perte de production due aux travaux de maintenance

$C_{dm'}$: coût de démarrage après maintenance.

Il existe deux principales façons complémentaires d'organiser les actions de maintenance, à savoir :

- ✓ **La maintenance préventive (C_{PM})** : maintenance exécutée à des intervalles prédéterminés ou selon des critères prescrits et destinée à réduire la probabilité de défaillance ou la dégradation du fonctionnement d'un bien [16]. Selon les références [9 ; 17], le coût lié à ce type de maintenance est exprimé par l'équation (3.14).

$$C_{PM} = \sum_{\forall ij} \frac{1}{M_{ij}} C_{ij}^{PM} N_{ij} \quad (3.14)$$

Avec :

M_{ij} : fréquence (intervalle) de maintenance préventive pour le composant ij , qui peut être déterminée par le nombre des opérations de maintenance préventive N^{PM} sur une durée de référence T_r .

C_{ij}^{PM} : coût de maintenance préventive pour le composant ij .

N_{ij} : nombre des composants ij .

Remarque : Il convient de faire attention aux intervalles entre les maintenances préventives.

- ✓ **La maintenance corrective (C_{CM})** : maintenance exécutée après la détection d'une panne et destinée à remettre un bien dans un état dans lequel il peut accomplir une fonction requise [16]. Le coût sous-jacent à la maintenance corrective est formulé comme suit [9 ; 17].

$$C_{CM} = \sum_{\forall ij} f_{ij}^{CM} C_{ij}^{CM} \cdot N_{ij} \quad (3.15)$$

$$C_{ij}^{CM} = (T_r \cdot C_{hr}) + C_{SP} \quad (3.16)$$

Avec :

f_{ij}^{CM} : fréquence de maintenance corrective pour le composant ij , qui peut être approchée par son taux de défaillance λ_{ij}^{total} (an^{-1}).

C_{ij}^{CM} : coût de maintenance corrective pour le composant ij .

N_{ij} : nombre des composants ij .

T_r : le temps de réparation.

C_{hr} : coût horaire de réparation.

C_{SP} : coût moyen des dépenses de pièces de rechange.

- **Remarque** : la période de garantie doit être prise en compte dans le calcul de C_{CM} . De plus, il convient de considérer la possibilité de déclenchements intempestifs imputables aux actions de maintenance. Ceci reste valable en ce qui concerne les tests fonctionnels

- **Coût de tests fonctionnels (C_T)** : Le test fonctionnel ou de preuve (*proof test*) est une activité exécuté périodiquement, visant à détecter les différents modes de défaillances susceptibles de se produire au niveau d'un composant donné. Il est important de différencier entre la maintenance préventive (citée précédemment) et ce type de test. En effet, ce dernier est plus profond et nécessite une mobilisation de ressources plus importante. L'équation (3.13) reste valable pour calculer le coût lié à un test spécifique. En outre, selon [18], le coût du test est donné par la formule suivante :

$$C_T = \sum_{\forall ij} \frac{1}{TI_{ij}} C_{ij}^T N_{ij} \quad (3.17)$$

$$C_{ij}^T = T_t C_{ht} \quad (3.18)$$

Avec :

TI_{ij} : intervalle de test périodique pour le composant ij .

C_{ij}^T : Coût de test périodique pour le composant ij .

N_{ij} : nombre des composants ij .

T_t : durée du test.

C_{ht} : coût horaire de test.

Remarque : Il convient de faire attention aux intervalles entre les tests fonctionnels.

- **Coût d'arrêt intempestif (C_{ST})** : L'arrêt intempestif (ST : *spurious trip*) est un arrêt partiel ou complet du processus sans la présence d'une demande réelle sur la fonction de sécurité [19]. Ce type d'arrêt est préjudiciable au bon fonctionnement du procédé surveillé et entraîne donc des pertes de production. Dans cette étude, nous considérons que les causes des déclenchements intempestifs d'un composant sont au nombre de trois : défaillances interne ou propres, tests périodiques et activités de maintenance. Les taux de déclenchements intempestifs (STR : *Spurious Trip Rate*) respectifs sont : STR_{λ} , STR_{Test} et STR_{Maint} . Il convient de signaler que STR_{Test} et STR_{Maint} sont nuls dans le cas où les tests ou les activités de maintenance sont exécutés lorsque le procédé est à l'arrêt ou lorsque le système de sécurité est en mode « inhibition : *override* ». Le mode inhibition signifie que le système de sécurité est déconnecté du procédé surveillé (désactivé). Ceci est généralement le cas pour les activités de maintenance. Cela dit et selon [17] :

$$STR = STR_{\lambda} + STR_{Test} \quad (3.19)$$

$$STR_{Test} = \frac{1}{TI} P_{r-trip} = \frac{1}{TI} \cdot \frac{N_{trips}}{N_{tests}} \quad (3.20)$$

Avec :

TI : intervalle de test périodique.

P_{r-trip} : probabilité de déclenchement intempestif induit par le test (retour d'expérience).

N_{trips} : nombre de déclenchements intempestifs induits par les tests sur une période d'observation.

N_{tests} : nombre de tests sur une la même période d'observation.

Le coût relatif aux déclenchements intempestifs peut être exprimé comme suit.

$$C_{ST} = C_{pp''} + C_{M'} + C_{T'} + C_{dm''} \quad (3.21)$$

$$C_{pp''} = STR C_{SD} \quad (3.22)$$

$$C_{SD} = SD_{Time} \cdot SD_{LOSS} \quad (3.23)$$

Avec :

$C_{pp''}$: coût de la perte de production due aux déclenchements intempestifs.

$C_{M'}$: coût de maintenance due aux déclenchements intempestifs.

$C_{T'}$: coût de test dû aux déclenchements intempestifs.

C_{dm*} : coût de démarrage après un déclenchements intempestif.

C_{SD} : coût par arrêt intempestif.

SD_{Time} : durée d'un arrêt intempestif.

SD_{LOSS} : coût de la perte de la production par heure.

Quant aux coûts de test et de redémarrage, ils peuvent être calculés de la même manière mentionnée précédemment. Concernant les coûts de maintenance du aux déclenchements intempestifs, ils sont déjà inclus dans les coûts de maintenance corrective.

- **Coût de démantèlement (C_{dis})** : L'élimination d'un équipement en fin de vie se traduit par le coût de démantèlement, qui peut être estimé par le cout d'installation (C_{inst}), mais en tenant compte du facteur temps :

$$C_{dis} = \begin{cases} C_{inst}(1+r)^{-N}, & \text{en cas d'accord préalable } (C_{dis} = C_{inst}) \\ C_{inst}(1+r)^N, & \text{en l'absence d'accord préalable.} \end{cases} \quad (3.24)$$

Avec :

r : taux d'actualisation.

N : durée de vie en années.

- **Autres coûts ($Coth$)** : les autres coûts représentent tous les coûts liés à la barrière de sécurité qui n'ont pas été abordés dans les sections précédentes, tels que : supervision, documentation, inspection, audit, assurance, coût de risque, etc.
L'ajout d'une barrière de sécurité peut créer des risques supplémentaires et/ou intensifier ceux qui existent déjà (en raison des travaux qui y sont associés, tels que la maintenance, le redémarrage, ou en raison des caractéristiques de ses composants).

De plus, cette barrière peut être coûteuse, l'entreprise cherchera donc à la sécuriser (cout d'assurance).

Dans de nombreux cas, il est habituel de calculer les coûts du cycle de vie (les coûts d'exploitation) en termes de valeur actuelle plutôt que de valeur future. La valeur actuelle d'une rente (PV_A) est la somme des valeurs actuelles de tous les paiements : elle représente le montant d'argent qui doit être investi maintenant afin d'effectuer les paiements futurs requis.

La PV_A peut être obtenue en utilisant la formule suivante [20], en supposant que les paiements sont effectués à la fin de chaque période, pour N paiement de M (dinar, dollars, euro...) et à une remise de taux R :

$$PV_A = M(1 + R)^{-1} + M(1 + R)^{-2} + \dots + M(1 + R)^{-N} = M \cdot [1 - (1 + R)^{-N}/R] \quad (3.25)$$

3.3 Les bénéfices d'une barrière de sécurité

Les bénéfices d'un projet d'investissement de sécurité est l'objectif de ce projet : les dommages et pertes évités d'un accident (coût de cet accident). Comme nous l'avons déjà mentionné, l'estimation de ces pertes nécessite la détermination des zones influencées par l'accident (*phénomènes dangereux*) en fonction du degré de cette influence (*intensité des effets*) et des différents éléments vulnérables qui s'y trouvent. Une statistique des pertes attendues peut être établie par la combinaison des différentes zones d'impact ou de menace (rayonnement thermique, surpression, concentration de substances toxiques libérées, etc.), des cibles potentielles et des probabilités associées aux différents scénarios d'accidents [21].

Les effets susceptibles d'être générés sur un site industriel sont [22] :

- **Effets thermiques** : flux thermique lié à la combustion plus ou moins rapide d'une substance inflammable ou combustible.
- **Effets de surpression** : l'explosion provoque des ondes de pression, détonation ou déflagration en fonction de la vitesse de propagation de l'onde de pression.
- **Effets toxiques** : la fuite ou le rejet d'une substance toxique provoque des effets toxiques résultant de l'inhalation, de l'ingestion ou de pénétration par voie cutanée de ces substances.
- **Effets missiles ou projectiles** : liés à l'impact d'un projectile engendré par une explosion. Notons que les modèles disponibles utilisés pour la détermination de l'étendue et de la direction des projectiles ne sont encore pas matures.

L'évaluation précise des coûts d'accidents industriels aide les gestionnaires à planifier correctement leurs investissements dans les mesures de sécurité, en termes de choix des procédés qui nécessite ce type d'investissement et de management qui assure la pérennisation des mesures de sécurité [23].

3.3.1 Le coût d'accident

Les entreprises portent un lourd fardeau en raison des accidents de travail et des maladies professionnelles, qui ont engendré. Selon le rapport de l'organisation internationale du travail (2019), plus de 2,78 millions de décès sont recensés chaque année à cause des accidents du travail ou des maladies professionnelles. De plus, environ 374 millions d'accidents du travail non mortels se produisent annuellement. Les mauvaises pratiques en matière de santé et de sécurité au travail ont coûté près de 4 % du produit intérieur brut mondial, en raison des jours de travail perdus [24]. En Algérie, les accidents du travail et les maladies professionnelles ont coûté plus de 44 milliards DA à la CNAS (Caisse Nationale des Assurances sociale de travailleurs Salariés) en 2006/2007 [25].

En raison de l'importance des coûts d'accidents, leur estimation a intéressé les chercheurs, et ce depuis les travaux de Heinrich en 1931 : Heinrich (1959) [26], Bird (1974) [27], Simon et Grimaldi (1975) [28], Gavions et al. 2009 [22] ; et Brijis et Reiners (2013) [29]. Dans ce qui suit, nous présentons sommairement deux modèles d'estimation des coûts d'accidents industriels en raison de leurs détails et clarté.

3.3.1.1 Modèle de Gavions et al

Gavions et al. Ont proposé une méthode d'évaluation fiable des coûts liés aux accidents industriels, en particulier en ce concerne les pertes de production. Le modèle proposé est donné par les formules suivantes. Plus de détail est fourni au tableau 3.2.

$$Coût\ Total = C_{Direct} + C_{Indirect} + C_{Payment} + C_{Immesurable} \quad (3.26)$$

$$C_{Direct} = C_{Damage} + C_{Medical} + C_{Fine} + C_{Insurance} \quad (3.27)$$

$$C_{Indirect} = C_{Capacity-lost} + C_{Schedule} + C_{Recruit} + C_{Worktime} + C_{Wip} + C_{mang} \quad (3.28)$$

Tableau 3.2: Modèle de Gavions et al. [23]

Coûts		Description
<i>Coût direct</i>	C_{Damage}	coût de la réparation et de remplacement de l'équipement coût du nettoyage environnemental
	$C_{Medical}$	coût du aux blessures potentielles associées d'un accident
	C_{Fine}	coût des amendes aux quelles l'entreprise est exposée
	$C_{Insurance}$	différence entre le coût de l'assurance avant et après l'accident
<i>Coût indirect</i>	$C_{Capacity-lost}$	coût résultant de la perte de capacité de production (ralentissement out arrêt)
	$C_{Schedule}$	coût résultant du non-respect du calendrier causant des dommages au client
	$C_{Recruit}$	coût de l'embauche de travailleurs supplémentaires pour remplacer les blessés
	$C_{Worktime}$	coût dû au temps passé à d'autres besoins en raison de l'accident (par exemple : l'investissement dans une enquête sur l'accident)
	C_{Wip}	coût dû au goulot d'étranglement crée par l'accident (par exemple : la croissance des stocks et donc la croissance des coûts qui y sont liés)
	C_{mang}	coût lié au temps du PDG
$C_{Payment}$		surcoût marginal dû à l'accident(Le coût de l'indemnisation des travailleurs accidentés)
$C_{Immesurable}$		$C_{Reputation}$: coût d'atteinte à la réputation de l'entreprise C_{Moral} : coût lié à l'impact de l'accident sur le moral des travailleurs

3.3.1.2 Modèle de Brijis et Reiners

Dans cette étude, à l'instar de certaines études ultérieures [10, 12, 13 et 30], les bénéfices globaux ou les coûts hypothétiques d'accident sont calculés par l'addition de la contribution de huit catégories de bénéfices hypothétiques, et ce pour chaque scénario j considéré dans l'analyse :

$$C_{loss,j} = B_{sup.ov} + B_{damage.ov} + B_{legal.ov} + B_{ins.ov} + B_{h\&e.ov} + B_{intv.ov} + B_{rept.ov} + B_{oth.ov} \cdot \forall j \in \{1, \dots, m\}, m \in Z \tag{3.29}$$

La signification de chacune de ces catégories de même que leurs sous-catégories respectives sont illustrées au tableau 3.3.

Tableau 3.3: Modèle de Brijis et Reiners. [29]

Catégories	Sous-catégories
B _{sup.ov} : Supply chain benefits.	Production loss. Start-up Schedule
B _{damage.ov} : Damage benefits.	Damage to own material / property. Damage to outer companies material /property. Damage to surrounding living areas. Damage to public material /proprerty
B _{legal.ov} : Legal benefits.	Fines Interim lawyers Specialized lawyers Internal research team Experts at hearings Legislation benefit Permits and licences
B _{ins.ov} : Insurance benefits.	Insurrancepremuims
B _{h&e.ov} : Human and Environmental benefits.	Compensation victim Injured employees Recruiting Environmental damage
B _{intv.ov} : Intervention benefits.	Intervention
B _{rept.ov} : Reputation benefits.	Shareprice
B _{oth.ov} : Other benefits.	Manager working time Cleaning

3.3.2 Modèle d’estimation des bénéfices

L’évaluation des bénéfices consiste en la définition des coûts dérivés d’un scénario accidentel hypothétique. Les pertes résultantes sont les décès, les blessés et autres dommages directs et indirects, compte tenu de la valeur et de la vulnérabilité des personnes et des biens [29]. Afin d’extraire les bénéfices hypothétiques de la mesure de sécurité dans le cadre de l’ACB, la situation doit être examinée sans et avec prise en compte de cette mesure [10] (voir figure 3.3).



Figure 3.3: Comparaison entre deux situations : avec et sans mesure [5].

Les bénéfices à intégrer selon [4] sont :

1. Les bénéfices humains : réduction de risque de mortalité ou de blessure impactant les travailleurs sur le site, sites avoisinants et la population locale.
2. Les impacts environnementaux évités.
3. Les dommages matériels évités (sur site et hors site).
4. Les pertes de production évitée à cause de l'accident qui conduit à des problèmes avec les clients.
5. Évitement du déploiement de mesures comprises dans le plan d'urgence : modalisation des secours publique, mesures d'évacuation de la population.
6. Évitement de mesures de mise en sécurité du site suite à un accident (décontamination post-accidentelle, évacuation et élimination des produits dangereux présents sur le site, mise en œuvre de moyens de limitation de l'accès au site, surveillance des effets de l'installation sur son environnement).
7. Évitement du temps de travail perdu pour l'enquête interne post-accidentelle, la participation éventuelle à un procès, les frais de justice éventuels (pour l'ensemble de la société, c'est-à-dire le coût de fonctionnement des tribunaux, les frais d'avocat, le temps de travail mobilisé pour les victimes, témoins et prévenus.
8. Il est important d'intégrer et de comptabiliser l'ensemble des bénéfices d'une mesure.

Dans ce qui suit, nous allons développer un modèle permettant l'estimation des coûts des accidents afin d'en dériver les bénéfices des investissements de sécurité, résultants de l'atténuation ou de l'élimination des risques. Ce modèle trouve ses fondations dans : les deux modèles présentés précédemment (Gavions *et al.* [22], Brijis et Reiners [29]), les recommandations de Meunier et Marsden [4], les travaux présentés dans [5 ; 10-13 ; 15 ; 30] et le document [23].

3.3.2.1 Bénéfices directs

Ces bénéfices représentent le but principal de la mesure de sécurité : la protection des personnes (*bénéfice humain* : C_H), de l'environnement (*bénéfice environnemental* : C_E) et du matériel (*bénéfice matériel* : C_M). Le coût direct peut donc être formulé ainsi :

$$\text{Coût direct} = \text{bénéfice direct} = C_H + C_E + C_M \quad (3.30)$$

- **Coût Humain (C_H)** : les accidents majeurs génèrent un risque de mortalité ou de blessure sur les personnes présentes à l'intérieur de l'entreprise et/ou à l'extérieur du (la population avoisinante et les personnes empruntant des voies de transport à proximité du site, etc.). L'avantage de la réduction de ce risque se traduit en termes de vies *statistiquement sauvées* et des *blessures statistiquement évitées*.

$$C_H = VSV \cdot n + \sum_{\forall i} VSV'_i \cdot n'_i \quad (3.31)$$

Avec :

VSV : valeur statistique de vie.

n : nombre de morts.

i : catégories des blessures.

VSV'_i : valeur statistique de la blessure i .

n'_i : nombre des personnes ayant subi la blessure i .

Selon le rapport [32], le coût des blessés peut être approché par l'expression (3.32) :

$$\sum_{\forall i} VSV'_i n'_i = 0,15 \cdot VSV \cdot n_a + 0,022 \cdot VSV \cdot n_b \quad (3.32)$$

Avec :

n_a : nombre des blessures graves.

n_b : nombre des blessures légères.

- **Coût matériel (C_M)** : les accidents entraînent des dommages matériels aussi bien à l'intérieur de l'installation industrielle qu'à l'extérieur (les éventuelles installations avoisinantes et les habitations à proximité). Pour ces coûts, nous nous basons sur ce qui a été indiqué à la référence [23]. Les dommages internes sont classés de la manière suivante (les coûts correspondants sont indiqués entre parenthèse) :

✓ *Dommages aux équipements et machines de l'entreprise (C_{MiA}).*

✓ *Dommages aux bâtiments et à l'infrastructure de l'entreprise (C_{MiB}).*

✓ *Dommages aux matières premières et aux produits finis de l'entreprise (C_{MiC}).*

Quant aux dommages externes, ils peuvent être classés en :

✓ *Dommages aux biens de particulier (C_{bp})* : maisons individuelles, bâtiment, véhicules à moteur, ...

✓ *Dommages aux biens professionnels privés (C_{bpp})* : magasins (épicerie, vêtements, meubles ...), centres commerciaux, entrepôts, industries privées, ...

✓ *Dommages aux biens des collectivités territoriales (C_{bct})* : lycées, complexes sportifs, voirie régionale, bibliothèque régionale, ...

✓ *Dommages aux biens de l'état et des établissements publics (C_{be})* : ambassade, consulat, cité universitaire, caserne, tribunal, route national, réseaux ferroviaires, ...

Le coût matériel peut donc être exprimé par les équations suivantes :

$$C_M = C_{Mi} + C_{Mex} \quad (3.33)$$

$$C_{Mi} = C_{MiA} + C_{MiB} + C_{MiC} \quad (3.34)$$

$$C_{Mex} = C_{bp} + C_{bpp} + C_{bct} + C_{be} \quad (3.35)$$

C_{Mi} représente le coût matériel interne, tandis que C_{Mex} indique le coût matériel externe.

Pour estimer le coût de dommages matériels potentiels, on peut appliquer une simple formule [23] :

$$C_{Mx} = \text{valeur vénale du bien } (x) \times \text{nombre d'unités de biens } (x) \times \text{taux moyen de destruction } (x) \quad (3.36)$$

- **Remarque : la valeur vénale** représente le coût de la *reconstruction* ou de la *réhabilitation* des biens *totale*ment détruits par l'accident. Elle est estimée : en *devise* par mètre carré pour les constructions, par mètre linéaire pour les infrastructures et par unités pour les véhicules de particuliers. **Le taux moyen de destruction** est lié essentiellement au type et au seuil d'effet ainsi que la cible.
- **Coût environnemental (C_E)** : l'accident s'accompagne de dommages environnementaux qui peuvent se traduire par des coûts de pollution, principalement liés à des effets sur la santé humaine et à son impact sur le réchauffement climatique. Ce coût est fonction du type de pollution et du polluant.

$$C_E = \sum_{\forall i} m_{spi} \times C_{spi} + C_{REM.L.T} + C_{aut} \quad (3.37)$$

Avec :

i : le type de produit déversé.

m_{spi} : quantité du produit déversé (*i*) en (kg) ou (m³).

C_{spi} : coût de pollution par unité de produit déversé (*i*) (€/kg) ou (€/m³) (ex : coût effet de serre).

C_{REM.L.T} : coût d'assainissement à long terme (€).

C_{aut} : autres coûts.

3.3.2.2 Bénéfices indirects

Ils représentent les bénéfices que l'on obtient de la mesure de sécurité hors bénéfices directs, qui caractérisent souvent une réduction des coûts indirects des accidents ainsi que les bénéfices supplémentaires la mesure de sécurité. Les différentes catégories des bénéfices indirects sont données par la relation (3.38). Elles sont détaillées dans ce qui suit.

$$\text{Bénéfices indirects} = C_{ca} + C_{ch} + C_{rem} + C_{as} + C_{enq} + C_{int} + C_{net} + C_l + C_{PDG} + C_{rep} + C_{aut} + C_{sp} \quad (3.38)$$

- **Coût lié à la chaîne d'approvisionnement (C_{ca})** : les dommages causés à l'entreprise mènent souvent à un arrêt ou à une fluctuation de la production, ce qui entraîne des pertes financières importantes pour l'entreprise. Sur la base de [10], cela peut être exprimé comme suit :

$$C_{ca} = C_{cpp} + C_{cd} \quad (3.39)$$

$$C_{cpp} = \sum_{\forall i} Q_i P_i t_{1i} \quad (3.40)$$

$$C_{cd} = \sum_{\forall i} (Q_i - Q_i^*) P_i t_{2i} \quad (3.41)$$

Avec :

C_{cpp} : coût de perte de production.

C_{cd} : coût de démarrage.

C_{cpp} : coût de perte de production.

i : produit arrêté ou oscillant i .

Q_i : taux de production relatif au produit i ($\frac{\text{quantité d'unité}}{\text{unité de temps}}$).

P_i : prix par unité (i) vendue.

t_{1i} : durée de l'arrêt en production de produit (i).

Q_i^* : taux de production relatif au produit i dû à la perturbation (start-up).

t_{2i} : durée entre le moment où la ligne de production est réactivée et le moment où la ligne de production revient à la cadence de production initiale.

- **Coût lié au calendrier des horaires (C_{ch})** : l'arrêt ou le ralentissement de la production cause des dommages au client, qui à son tour affecte la production (annulation du contrat ou de la commande, demande d'indemnisation ou demande d'un prix inférieur). Dans certains cas, l'entreprise peut faire appel à un sous-traitant pour produire le produit manquant et ainsi répondre aux exigences des clients.

$$C_{ch} = C_{com.a} + C_{dem.a} + C_{dem.r} + C_{de} + C_{ent} \quad (3.42)$$

$$\text{Où : } \begin{cases} C_{con.a} = F_{ca}n_{ca} \\ C_{dem.a} = F_d n_d \\ C_{dem.r} = K \sum_{i=1}^{n_{cl}} d_i \\ C_{de} = G(P_{new} - P_{old}) \\ C_{ent} = Z(P - M) \end{cases} \quad (3.43)$$

Avec :

$C_{com.a}$: coûts des commandes annulées.

F_{ca} : amendes d'une commande annulée.

n_{ca} : nombre des commandes annulées.

$C_{dem.a}$: coûts des contrats annulés.

F_d : amendes d'un contrat annulé.

n_d : nombre des commandes annulées

$C_{dem.r}$: coûts des retards de livraisons.

K : amendes pour retard de livraison.

n_{cl} : nombre de commandes livrées en retard

d_i : nombre de jours de retard de la commande i .

C_{de} : coût d'une demande de réduction de prix.

G : nombre d'unités commandées.

P_{new} : nouveau prix de l'unité i .

C_{ent} : coût de l'embauche d'un sous-traitant pour couvrir les commandes.

Z : nombre d'unités fournies par le sous-traitant.

P : coût par unité fournie par le sous-traitant.

M : coût de production unitaire.

- **Coût de remplacement (C_{rem})** : les dommages aux travailleurs (décès, blessures) obligent l'entreprise à compenser ce vide par l'embauche de travailleurs supplémentaires (qui comprend le temps investi dans le recrutement et la formation des nouveaux travailleurs) et/ou par les heures de travail supplémentaires nécessaires pour remplacer les travailleurs blessés :

$$C_{rem} = \sum_{i=1}^E (C_{Hi} + C_{Ti}) \cdot n_i + \sum_{i=1}^f \sum_{j=1}^{f'} P_{Sij} H_{ij} \quad (3.44)$$

Avec :

E : nombre de catégories des nouveaux employés.

C_{Hi} : coût de recrutement par employé de catégorie i .

C_{Ti} : coût de la formation par employé de catégorie i .

n_i : nombre d'employés de catégorie i .

f : nombre des catégories d'employés i pour les heures supplémentaires.

f' : nombre des catégories des heures supplémentaires.

P_{Sij} : coût d'heure supplémentaire j pour le travailleur i .

H_{ij} : nombre des heures supplémentaires j pour le travailleur i .

n_{ij} : nombre d'employé de catégorie i pour les heures supplémentaires j .

- **Coût d'assurance (C_{as})** : le coût d'assurance pour toute année est lié aux accidents de l'année écoulée, ce qui signifie que l'accident est un facteur qui affecte les primes d'assurance. Ainsi, la différence entre le paiement précédent et le nouveau peut être considéré comme un intérêt (bénéfice). Il s'exprime selon [10] comme suit :

$$C_{as} = P_F \cdot I_{PF} \quad (3.45)$$

Avec :

P_F : coût total actuel de la prime de l'établissement.

I_{PF} : augmentation prévue de la prime (%).

- **Coût d'enquête (C_{enq})** : coût de l'enquête d'investigation. Il peut être formulé comme suit.

$$C_{enq} = \sum_{i=1}^w T_i \cdot C_i + C_{aut} \quad (3.46)$$

Avec :

w : nombre de catégories d'employés.

T_i : nombre d'heures consacrées par le travailleur i à l'enquête.

C_i : coût (par heure) du temps perdu de travailleur.

- **Coût d'intervention et nettoyage (C_{int} et C_{net})**. Le processus accidentel, notamment les accidents majeurs, nécessite généralement une intervention interne et/ou externe pour contrôler ses conséquences et empêcher sa propagation. Il existe également une nécessité de nettoyer le périmètre de l'accident, d'évacuer et d'éliminer les produits

dangereux présents sur le site. Les formules (3.47) et (3.48) donnent respectivement les coûts d'intervention et de nettoyage [30].

$$C_{int} = \sum_{i=1}^R C_{si} + \sum_{i=1}^{R'} C_{MEi} N_{MEi} + \sum_{i=1}^{R''} C_{MONTi} \cdot N_{MONTi} + C_{oth.inv} \quad (3.47)$$

$$C_{net} = \sum_{i=1}^L W_{ci} h_{ci} n_{ci} \quad (3.48)$$

Avec :

R : nombre d'organisations/services d'urgence impliqués.

C_{si} : coûts d'intervention d'organisation/service d'urgence (i) à la charge de l'entreprise.

R' : nombre de matériel d'urgence impliqué lors d'une intervention d'urgence.

C_{MEi} : coût unitaire du matériel i utilisé lors d'une intervention d'urgence.

N_{MEi} : quantité d'unités de matériau i utilisées lors d'une intervention d'urgence.

R'' : nombre de catégories d'actions de surveillance post-accident.

C_{MONTi} : coût unitaire de l'action de surveillance de type i .

N_{MONTi} : nombre d'action de la surveillance de type i .

L : nombre de catégories d'opérations de nettoyage.

W_{ci} : salaire horaire d'un employé de nettoyage de catégorie i .

h_{ci} : nombre d'heures travaillées par employé de nettoyage de catégorie i .

n_{ci} : nombre d'employés de nettoyage de catégorie i .

- **Coût légal (C_l):** représente tous les coûts légaux résultant d'un accident.

L'expression (3.49) ces différentes contributions [12] :

$$\left\{ \begin{array}{l} A + B + C, \quad \text{coûts liés aux amendes} \\ C_a, \quad \text{coûts des avocats} \\ C_{er}, \quad \text{coûts de l'équipe de recherche interne} \\ \sum_{i=1}^t w_i h_i n_i, \quad \text{coûts des experts lors des audiences} \\ S_b \times I_{sb}, \quad \text{coût de la législation} \\ C_{CD} \times I_p, \quad \text{coûts de permis et licences} \end{array} \right. \quad (3.49)$$

Avec :

A : amendes de responsabilité civile.

n_i : nombre d'employés de la catégorie i .

B : amendes de responsabilité pénale.

S_b : budget total de sécurité de l'installation.

C : amendes de responsabilité administrative.

I_{sb} : augmentation du budget de sécurité de l'installation après un accident majeur (%).

t : nombre de catégories d'employés

C_{CD} : coût lié à la fermeture des installations.

w_i :salaire horaire de la catégorie i

I_p : probabilité de perte du permis d'exploitation.

h_i : nombre d'heures de travail du travailleur i .

- **Coût PDG (C_{PDG})** : ce coût est lié au temps du PDG. En effet, le temps investi par le PDG se traduit par des ventes de l'entreprise. Donc toute utilisation abusive de ce temps suite à un accident est une perte des ventes (du chiffre d'affaires) pour l'entreprise. D'après [22], ce coût est calculé comme suit :

$$C_{PDG} = \begin{cases} \frac{T_P}{P_1} \cdot T \cdot C, & \text{si l'entreprise est contrôlée par la direction} \\ \frac{T_P}{P_2} \cdot T \cdot C, & \text{si l'entreprise est sous contrôle externe} \end{cases} \quad (3.50)$$

Avec :

T_P : pourcentage de temps consacré à la gestion de l'accident par le PDG.

T : pourcentage du bénéfice net sur les ventes de l'année dernière.

C : bénéfice net des ventes de l'année dernière.

$$\left. \begin{array}{l} P_1: 0.37\% \text{ (Hambrick\&Finkelstin 1995).} \\ P_2: 0.11\% \text{ (Hambrick\&Finkelstin 1995).} \end{array} \right\} [22].$$

- **Coût réputation (C_{rep})** : les dommages causés par l'accident et les problèmes qui en résultent pour les fournisseurs affecteront inévitablement la réputation de l'entreprise, ce qui peut se traduire par certaine perte de sa part du marché.

$$C_{rep} = M_{rep} D_{rep} \quad (3.51)$$

M_{rep} : valeur marchande totale actuelle de l'entreprise.

D_{rep} : baisse attendue au cours de l'action (%).

- **Autres coûts (C_{aut})** : les coûts non inclus dans liste précédente.
- **Bénéfices spécifique (B_{sp})** : les bénéfices issus de la mesure de sécurité autres que ceux liés à la réduction du risque d'accident (plutôt des ajouts positifs à l'installation).

Remarque : les bénéfices tels que les coûts d'exploitation doivent être calculés en termes de valeur actuelle plutôt que de valeur future à l'aide de l'équation (3.25).

3.4 Facteur de disproportion (DF)

La règle appliquée dans l'approche ACB est d'approuver le projet si les bénéfices l'emportent sur les coûts. Toutefois, dans le processus de décision selon le principe ALARP, la règle est d'adopter la procédure à moins que le sacrifice ne soit disproportionné par rapport au risque. Selon cette nouvelle règle, les coûts peuvent dépassés les bénéfices et la mesure reste raisonnablement faisable : existence d'un facteur de disproportion (DF : *disproportion factor*) entre les coûts et bénéfices. Le rôle de DF est la considération de l'importance de

l'aspect sécurité par rapport au coût de la prévention ou l'atténuation des accidents. Le DF permet également de rendre compte de la difficulté de quantifier de nombreux bénéfices : la sécurité est généralement un investissement qui procure l'évitement des accidents dans un avenir lointain.

Cette constatation est généralement vraie dans le cadre des risques majeurs, caractérisés par des conséquences importantes et des fréquences faibles (*HILP : high impact low probabilité*), où le processus ACB ne cherche pas à équilibrer les coûts et les bénéfices, mais plutôt l'adoption de mesures de sécurité à moins qu'elles impliquent des sacrifices disproportionnés par rapport aux coûts. Plus précisément, comme indique l'HSE-UK et d'autres organismes de réglementation : *plus le risque est grand, plus il faut dépenser pour le réduire et plus le parti pris en faveur de la sécurité est grand. Cela peut être représenté par une indication (DF) du niveau maximum de sacrifice qui peut être supporté sans qu'il soit jugé extrêmement disproportionné. On comprend alors : plus le niveau de risque est élevé, plus le DF l'est aussi. Ce principe de base est illustré à la figure 3.3 [35], tandis que la figure 3.4 fournie une application de ce même principe [36].*

À ce titre, l'HSE-UK [34] indique les valeurs suivantes : $DF = 3$ (risque pour les travailleurs), $DF = 2$ (risque faible pour le public), $DF = 10$ (risque élevés). Nous constatons que $DF = 10$ est la valeur supérieure généralement suggérée. Il convient de mentionner que Goose [33] fût le premier à établir une procédure permettant la détermination de DF associé à des mesures de réduction des risques. Cette procédure ne sera pas détaillée dans ce manuscrit.

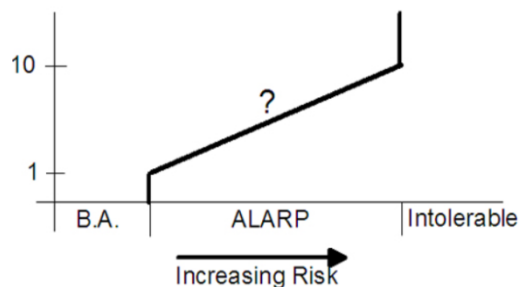


Figure 3.4: Augmentation de DF avec le risque [35].

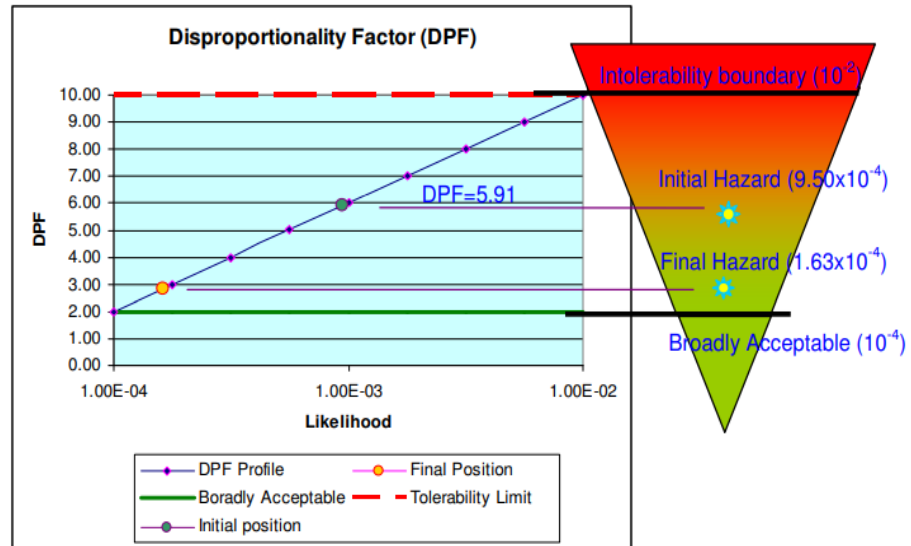


Figure 3.5: Détermination du facteur de disproportion (DF) [36].

En utilisant DF , les dépenses maximales justifiables (M_{js}) pour un accident donné peuvent être établies ainsi :

$$M_{js} = C_{ac} \cdot f_{ac} \cdot DF \quad (3.52)$$

Avec :

C_{ac} : coût de l'accident.

f_{ac} : fréquence de l'accident.

En fonction de la nature de l'investissement de sécurité (préventive ou corrective), les bénéfices correspondants peuvent être calculés selon l'équation (3.53) :

$$B_S = \begin{cases} C_{ac} \cdot (f_{ac1} - f_{ac2}), & \text{mesure préventive} \\ f_{ac} \cdot (C_{ac1} - C_{ac2}), & \text{mesure corrective} \end{cases} \quad (3.53)$$

Et selon l'équation (2.1) et (2.4) :

$$NAV = B_S \cdot DF - C_S \quad (3.54)$$

Avec :

B_S : bénéfices de sécurité.

C_{ac} : coût de l'accident.

f_{ac1} : fréquence de l'accident avant la mise en place de la mesure de sécurité ($=f_{ac}$).

f_{ac2} : fréquence de l'accident après la mise en place de la mesure de sécurité.

C_{ac1} : coût d'accident avant la mise en place de la mesure de sécurité (C_{ac}).

C_{ac2} : coût d'accident après la mise en place de la mesure de sécurité.

C_S : Le coût total de la barrière de sécurité.

DF : facteur de disproportion.

3.5 Rôle de l'ACB dans la répartition optimale du budget de sécurité

Dans cette section, nous montrons l'intérêt de l'ACB dans la répartition optimale du budget de sécurité. Pour ce faire, nous considérons ce problème de répartition comme celui du sac à dos. Ce processus est donné à la figure 3.5.

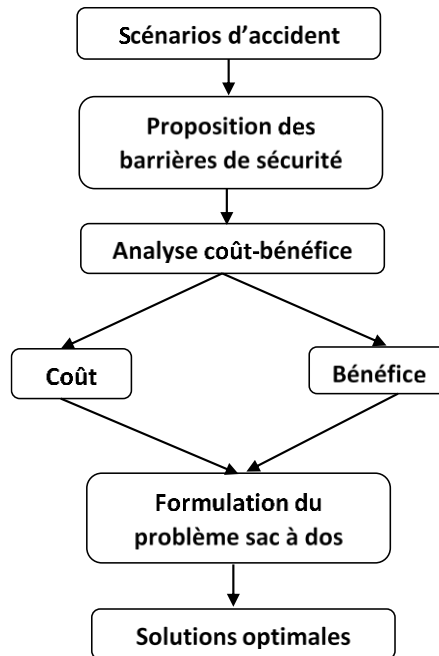


Figure 3.6: Processus répartition optimale du budget de la sécurité

Le problème du sac à dos (*KP : Knapsack Problem*) est l'un des problèmes d'optimisation combinatoire les plus importants. On trouve de nombreuses applications pratique de ce problème, telles que : les problèmes d'investissements et sélection des projets [37 ; 38], la gestion de portefeuilles [39], transport [40], etc.

Le principe du KP peut être expliqué comme suit : « étant donné plusieurs objets(*n*) possédant chacun un poids (w_i) et une valeur (profit : p_i)et étant donné un poids maximal(C)pour le sac, quels objets faut-il mettre dans le sac de manière à maximiser le profit total sans dépasser le poids maximal autorisé pour le sac ? ». Ce principe est montré dans la figure suivante et peut être formulé comme suit [42].

$$KP = \begin{cases} \sum_{i=1}^n p_i X_i \\ \text{avec: } \begin{cases} \sum_{i=1}^n w_i X_i \leq C \\ X_i = \begin{cases} 1, & \text{si l'objet } i \text{ est sélectionné.} \\ 0, & \text{si non.} \end{cases} \end{cases} \end{cases} \quad (3.55)$$



Figure 3.7: Problème sac à dos [41].

- **Exemple d'étude** : une étude de cas simple est considérée pour illustrer la solution du problème posé précédemment (le problème de répartition du budget de sécurité). On considère une installation avec un budget de sécurité de 35000€. Cette installation peut être le siège de 4 scénarios d'accidents. Pour chacun de ces scénarios nous supposons qu'il existe un certain nombre de mesures de sécurité, ayant chacun un coût et un bénéfice (voir le tableau 3.4).

Tableau 3.4: Éléments du problème répartition du budget de sécurité.

Barrière de sécurité	Coût (w_i)	Bénéfice (p_i)
S11	10000	19550
S12	5000	12800
S13	3000	8000
S21	5000	42850
S22	20000	87400
S31	8000	7300
S32	10000	59000
S41	30000	90000
S42	50000	125000
S43	40000	80000
C= 35000€		

La solution de ce problème en termes de barrières de sécurité retenues est la suivante : S21, S22, et S32. Ceci correspond à un bénéfice total de 189250 € avec un coût total de 35000 €.

3.5 Conclusion

Au cours de ce troisième chapitre, nous avons présentés les différentes catégories de coûts et de bénéfices attachés à la mise en place des mesures de sécurité. Par ailleurs, les différentes formulations mathématiques sous-jacentes ont été arborées d'une manière assez détaillée. Rappelons à ce titre que les bénéfices obtenus sont calculés en estimant la différence des coûts d'accident sans et avec la mise en œuvre de la mesure de sécurité. Nous avons ensuite discuté l'importance de l'introduction du facteur de disproportion (DF), qui permet d'ajuster le seuil de tolérance des coûts à prévoir en fonction du niveau de risque étudié. Finalement, l'idée de la répartition optimale du budget de sécurité, vue comme un problème ACB, a été illustrée au travers d'un exemple simple via la mise en œuvre de l'algorithme du problème sac à dos.

Références du chapitre 03 :

- [1] IEC 60300-3-3: (2004) – Dependability management – Part 3-3: Application guide – Life cycle costing.
- [2] ISO 15663-3: (2001) Petroleum and natural gas industries – Life cycle costing – Part 3: Implementation guidelines.
- [3] Goble, W. M. (2010). Control systems safety evaluation and reliability. ISA.
- [4] Meunier, V., & Marsden, É. (2009). Analyse coût-bénéfices : guide méthodologique. FonCSI.
- [5] Doligé, É. (2011). L'ACB (analyse coût/bénéfice) : une aide à la décision au service de la gestion des inondations. Guide à l'usage des maîtres d'ouvrage et de leurs partenaires. Centre Européen de Prévention du Risque d'Inondation (CEPRI).
- [6] Lydersen, S., & Aaroe, R. (1989). Life cycle cost prediction handbook, computer-based process safety systems. SINTEF Safety and Reliability.
- [7] Goble, W. M. (1998). Control Systems Safety Evaluation and Reliability, ISA, ISBN# 1-55617-636-8. Reference on FMEDA methods Failure rate calculations, 3.
- [8] Martorell, S., Sánchez, A., Carlos, S., & Serradell, V. (2002). Simultaneous and multi-criteria optimization of TS requirements and maintenance at NPPs. *Annals of Nuclear Energy*, 29(2), 147-168.
- [9] Torres-Echeverria, A. C., Martorell, S., & Thompson, H. A. (2009). Design optimization of a safety-instrumented system based on RAMS+ C addressing IEC 61508 requirements and diverse redundancy. *Reliability Engineering & System Safety*, 94(2), 162-179
- [10] Reniers, G., & Brijs, T. (2014). An overview of cost-benefit models/tools for investigating occupational accidents. *Chemical engineering transactions*, 36, 43-48.
- [11] Chen, C., Reniers, G., & Khakzad, N. (2020). Cost-benefit management of intentional domino effects in chemical industrial areas. *Process Safety and Environmental Protection*, 134, 392-405
- [12] Villa, V., Reniers, G. L., Paltrinieri, N., & Cozzani, V. (2017). Development of an economic model for counter terrorism measures in the process-industry. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 49, 437-460.

- [13] Reniers, G., Talarico, L., & Paltrinieri, N. (2016). Cost-benefit analysis of safety measures. In *Dynamic risk analysis in the chemical and petroleum industry* (pp. 195-205). Butterworth-Heinemann.
- [14] Reniers, G. L., & Van Erp, H. N. (2016). *Operational safety economics: a practical approach focused on the chemical and process industries*. John Wiley & Sons.
- [15] Chen, C., Reniers, G., Khakzad, N., & Yang, M. (2021). Operational safety economics: Foundations, current approaches and paths for future research. *Safety science*, 141, 105326.
- [16] FD X 60-000 Fonction maintenance <https://docplayer.fr/157142-Fonction-maintenance.html>
- [17] Torres-Echeverria, A. C., Martorell, S., & Thompson, H. A. (2009). Modelling and optimization of proof testing policies for safety instrumented systems. *Reliability Engineering & System Safety*, 94(4), 838-854.
- [18] Martorell, S. A., Serradell, V. G., & Samanta, P. K. (1995). Improving allowed outage time and surveillance test interval requirements: a study of their interactions using probabilistic methods. *Reliability Engineering & System Safety*, 47(2), 119-129.
- [19] Lundteigen, M. A., & Rausand, M. (2008). Spurious activation of safety instrumented systems in the oil and gas industry: Basic concepts and formulas. *Reliability engineering & system safety*, 93(8), 1208-1217.
- [20] Piermay, M., Hereil, O., Lazimi, A. (1989). *Mathématiques financières*. Economica.
- [21] Vianello, C., Milazzo, M. F., & Maschio, G. (2019). Cost–benefit analysis approach for the management of industrial safety in chemical and petrochemical industry. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 58, 116-123.
- [22] MEEDAAT (2007). Guide pour l'estimation des dommages matériels potentiels aux biens des tiers en cas d'accidents majeurs. Rapport technique, Ministère chargé de l'écologie.
- [23] Gavius, A., Mizrahi, S., Shani, Y., & Minchuk, Y. (2009). The costs of industrial accidents for the organization: developing methods and tools for evaluation and cost–benefit analysis of investment in safety. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 22(4), 434-438.

- [24] International Labour Organization (ILO). (2019). La sécurité et la santé au cœur de l'avenir du travail : Mettre à profit 100 ans d'expérience. International Labour Office. ISBN : 978-92-2-133154-4 tiré de www.ilo.org.
- [25] Ouddai, R. (2013). Étude des relations entre les coûts d'accidents et la performance en sécurité (Doctoral dissertation, Université de Batna 2).
- [26] Grimaldi, J. V., & Simonds, R. H. (1975). Safety Management (3rd ed.). Homewood, IL: Richard D. Irwin.
- [27] Heinrich, H. W., & Granniss, E. R. (1959). Industrial Accident Prevention: A Scientific Approach: Ass. McGraw-Hill.
- [28] Bird Jr, F. E. (1974). Management Guide to Loss Control (Atlanta, Institute Press).
- [29] Brijs, T., & Reniers, G. L. (2013). A tool for intelligent budget allocation of prevention measures related to major accidents. Safety and Security Engineering V, 134, 3.
- [30] Villa, V., Reniers, G. L., Paltrinieri, N., & Cozzani, V. (2017). Development of an economic model for the allocation of preventive security measures against environmental and ecological terrorism in chemical facilities. Process Safety and Environmental Protection, 109, 311-339.
- [31] Villa, V., Reniersb, G. L., & Cozzania, V. (2016). Application of cost-benefit analysis for the selection of process-industry related security measures. CHEMICAL ENGINEERING, 53.
- [32] Boiteux, M. (2001). Transports : choix des investissements et coûts de nuisances (dit « Rapport Boiteux 2 »). Rapport technique, Commissariat Général du Plan, France.
- [33] FICHEM, D. C. C. (2006). Gross disproportion, step by step—a possible approach to evaluating additional measures at COMAH sites.
- [34] Risk management : Expert guidance—HSE principles for Cost Benefit Analysis in support of ALARP. (s. d.). Consulté 23 July 2023, à l'adresse <https://www.hse.gov.uk/enforce/expert/alarpcba.htm>
- [35] Guidance on ALARP Decisions in COMAH - SPC/Permissioning/37. (s. d.). Consulté 23 July 2023, à l'adresse https://www.hse.gov.uk/foi/internalops/hid_circs/permissioning/spc_perm_37/
- [36] Yasseri, S. (2013). The ALARP argument. FABIG newsletter, (61).
- [37] Lorie, J. H., & Savage, L. J. (1955). Three problems in rationing capital. The journal of business, 28(4), 229-239.

- [38] Nemhauser, G. L., & Ullmann, Z. (1969). Discrete dynamic programming and capital allocation. *Management Science*, 15(9), 494-505.
- [39] Syam, S. S. (1998). A dual ascent method for the portfolio selection problem with multiple constraints and linked proposals. *European journal of operational research*, 108(1), 196-207.
- [40] [40] Zhong, T., & Young, R. (2010). Multiple choice knapsack problem: Example of planning choice in transportation. *Evaluation and program planning*, 33(2), 128-137.
- [41] Pan, X., & Zhang, T. (2018, August). Comparison and analysis of algorithms for the 0/1 knapsack problem. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1069, No. 1, p. 012024). IOP Publishing
- [42] Gherboudj, A. (2013). Méthodes de résolution de problèmes difficiles académiques. Thèse de Doctorat. Université de Constantine2.

Chapitre 04 :

Optimisation de la

conception des systèmes

instrumentés de sécurité

4.1. Introduction

Le développement industriel a conduit à de nombreux accidents majeurs. La source des risques dans ces industries réside souvent dans les déviations incontrôlées du procédé lui-même. Pour cela, des cadres détaillés ont été élaborés pour une gestion appropriée des risques associés, dans lesquels les systèmes instrumentés de sécurité (SIS) jouent un rôle important en tant que barrières de sécurité. L'importance de ce type de mesures de sécurité a conduit à l'émergence de plusieurs normes liées à la sécurité fonctionnelle, dont principalement la norme générique CEI 61508.

La conception d'un SIS qui peut assurer de manière appropriée les fonctions associées de réduction du niveau de risque nécessite la prise en compte de plusieurs facteurs. Cela comprend principalement l'aspect sécurité qui représente le but à atteindre, l'aspect opérationnel afin de réduire les effets opérationnels indésirables, et l'aspect coût qui est un facteur clé dans n'importe quel projet d'investissement.

Ce chapitre vise à fournir un cadre clair pour gérer ce problème de conception en considérant deux situations différentes couramment rencontrées dans les processus de gestion des risques. Un algorithme nouvellement développé sera utilisé pour résoudre ce problème dans les deux situations pour surmonter de nombreux inconvénients associés aux alternatives conventionnelles.

4.2. Généralités sur les systèmes instrumentés de sécurité

Les SIS jouent un rôle très important dans le domaine de la sécurité en particulier dans les installations modernes et complexes [1]. Cette complexité nécessite un encadrement approprié de leur utilisation en couvrant toutes les étapes de leur vie, de la conception jusqu'à la mise hors service. Cet encadrement est assuré par la norme internationale de la sécurité fonctionnelle CEI 61508 [2] qui est considérée comme un ensemble de règles et de recommandations pour améliorer la sécurité par l'utilisation des systèmes Électrique / Électronique / Électronique programmable (E/E/EP). En plus de cette norme générique, de nombreuses normes sectorielles ont également été élaborées, comme le montre la Figure 4.1.

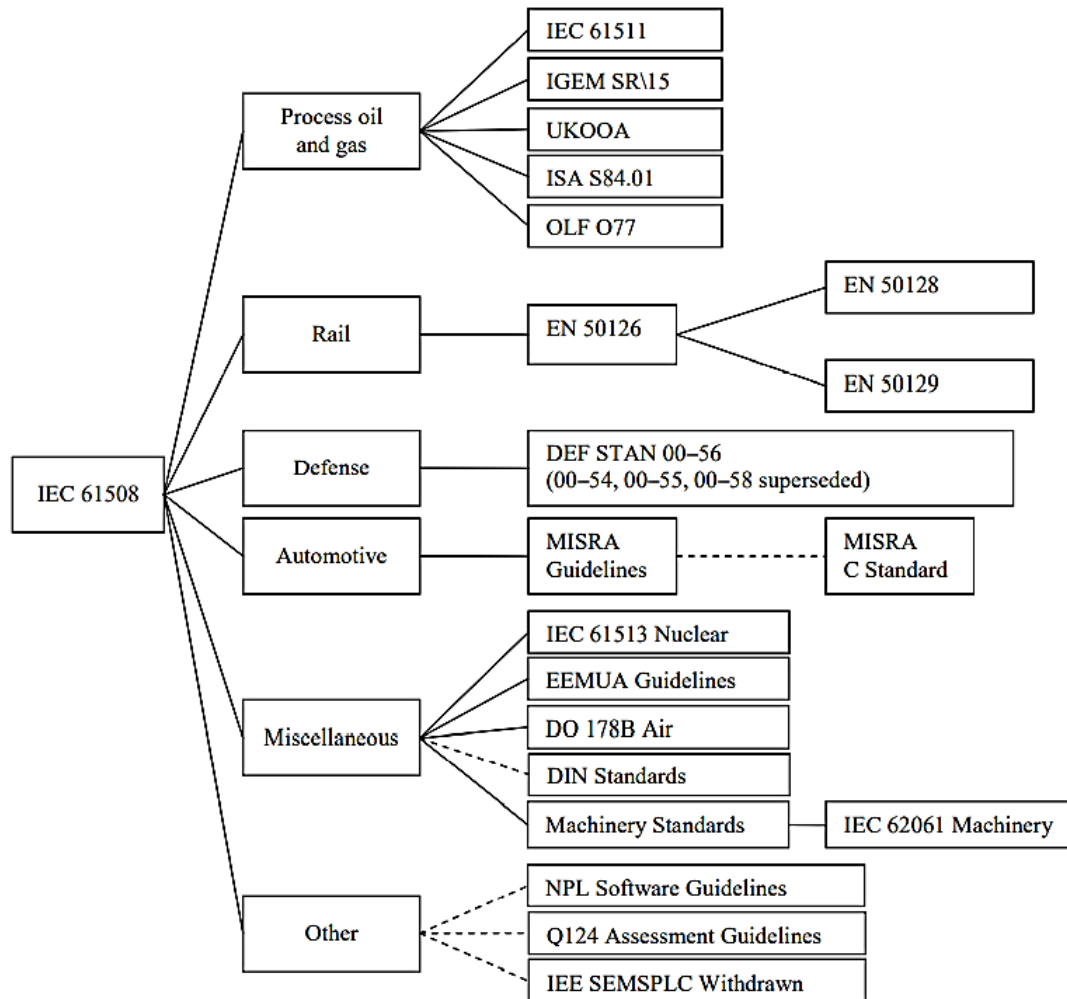


Figure 4.1: Relation de certaines normes et directives avec la CEI 61508 [3].

La norme CEI 61508 définit le SIS comme "un système E/E/PE relatifs aux applications de sécurité qui comprend tous les éléments du système nécessaires pour remplir la fonction de sécurité". Par ailleurs, selon la norme CEI 61511 [4] le SIS est "un système instrumenté utilisé pour mettre en œuvre une ou plusieurs fonctions instrumentées de sécurité (SIF) qui se compose de n'importe quelle combinaison de capteur(s), d'unités logique(s) et d'élément(s) final (aux)". Cette deuxième définition de la norme CEI 61511 montre l'architecture générale des SIS.

De ces définitions, il ressort que le SIS mettent en œuvre une ou plusieurs SIF pour assurer la sécurité des équipements sous contrôle (equipment under control : EUC) par rapport à un événement dangereux spécifique. Une SIF peut être considérée comme une barrière de protection fonctionnelle lorsque le système instrumenté de sécurité est considéré comme un système réalisant cette barrière de sécurité [5]. Un exemple typique d'une SIF peut être l'ouverture d'une vanne de fluide de refroidissement initiée par l'élévation de la température

Chapitre 04 : Optimisation de la conception des systèmes instrumentés de sécurité

d'un réacteur. La performance de ces fonctions est mesurée à l'aide du concept du "niveau d'intégrité de sécurité (SIL)".

La norme CEI 61508 est basée sur "le cycle de vie de sécurité" montré dans la Figure 4.2. Son objectif principal a géré toutes les activités nécessaires des SIS. Cela couvre toutes les phases dès le concept initial en passant par la conception, la mise en œuvre, l'exploitation et la maintenance jusqu'à la mise hors service [6].

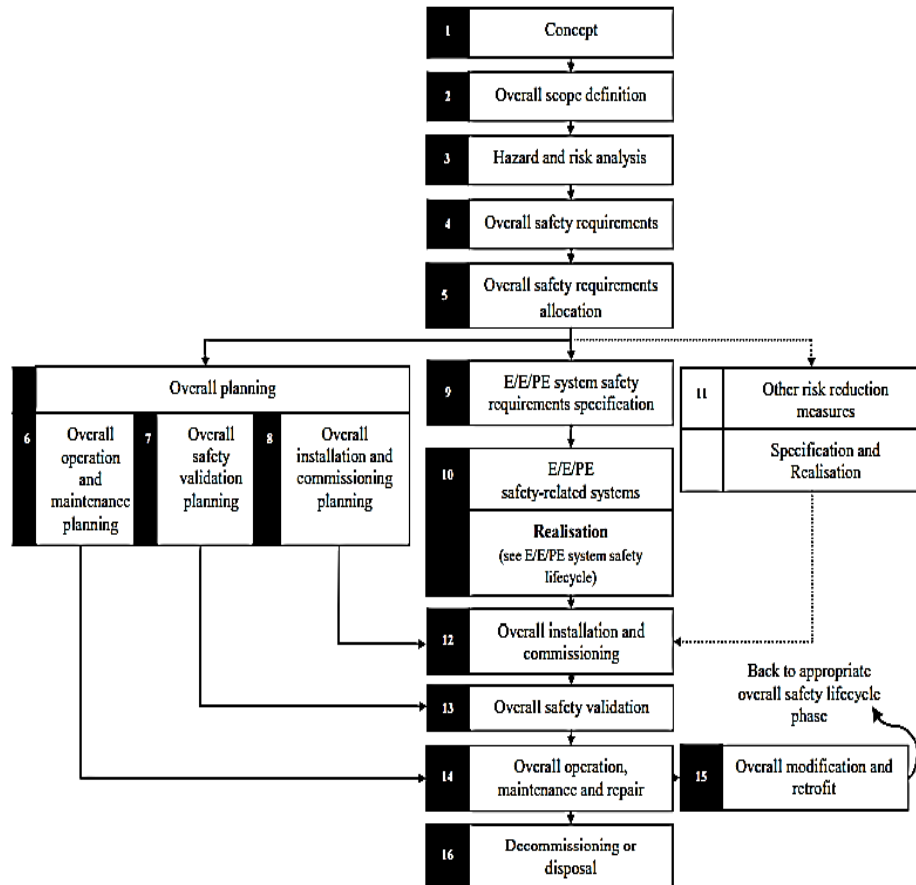


Figure 4.2: Cycle de vie de sécurité global [2].

4.2.1. Niveau d'intégrité de sécurité

L'intégrité de sécurité selon la CEI 61508 est "la probabilité qu'un système E/E/EP relatif à la sécurité exécute de manière satisfaisante la fonction de sécurité spécifiées dans toutes les conditions énoncées et dans une période de temps spécifique".

L'intégrité de sécurité comprend l'intégrité de sécurité du matériel ainsi que l'intégrité de sécurité systématique.

- *Intégrité de sécurité du matériel* : partie de l'intégrité de sécurité des systèmes relatifs à la sécurité liée aux défaillances aléatoires du matériel en mode de défaillance dangereux.
- *Intégrité de sécurité systématique* : partie de l'intégrité de sécurité des systèmes relatifs à la sécurité qui se rapporte aux défaillances systématiques dans un mode de défaillance dangereux, en précisant que l'intégrité systématique ne peut normalement, ou précisément être quantifiée mais simplement considérée d'un point de vue qualitatif.

Les fonctions de sécurité sont mesurées à l'aide du SIL où le SIL d'une fonction représente le niveau de réduction des risques qu'elle est capable à assignée ou atteindre. Ce concept peut également être utilisé pour mesurer les risques à réduire. La détermination du SIL peut être effectué par plusieurs méthodes quantitatives (ex., les arbres de défaillances et d'événements), semi-quantitatives (ex., analyse des couches de protection) ou qualitatives (ex., graphe de risque et matrice de gravité des événements dangereux).

Comme spécifié par la norme CEI 61508, la détermination du SIL diffère selon le mode de fonctionnement de la SIF :

- ✓ *Mode à faible sollicitation* : la SIF n'est réalisée que sur sollicitation, afin de faire passer l'EUC dans un état de sécurité spécifié, et où la fréquence des sollicitations n'est pas supérieure à une fois par an.
- ✓ *Mode à forte sollicitation* : la SIF n'est réalisée que sur sollicitation, afin de faire passer l'EUC dans un état de sécurité spécifié, et où la fréquence des sollicitations est supérieure à une fois par an.
- ✓ *Mode continu* : la fonction de sécurité maintient l'EUC dans un état de sécurité en fonctionnement normal.

Pour le premier mode, la mesure principale est la probabilité moyenne de défaillance à la demande qui est définie comme l'indisponibilité moyenne d'un SIS notée par "PFD_{avg}" (Average Probability of Failure on Demand). Pour les deux autres modes, la mesure est la fréquence moyenne de défaillance dangereuse d'un SIS notée par "PFH" (Probability of a Dangerous Failure per Hour).

Le Tableau 4.1 montre le lien entre ces mesures et les différents niveaux SIL.

Tableau 4.1: Niveaux d'intégrité de sécurité en fonction des mesures de défaillances [5].

Niveau d'intégrité de sécurité (SIL)	Mode de fonctionnement à faible sollicitation (PFD _{avg})	Mode de fonctionnement continu ou à forte sollicitation (PFH)
4	$\geq 10^{-5}$ à $< 10^{-4}$	$\geq 10^{-9}$ à $< 10^{-8}$
3	$\geq 10^{-4}$ à $< 10^{-3}$	$\geq 10^{-8}$ à $< 10^{-7}$
2	$\geq 10^{-3}$ à $< 10^{-2}$	$\geq 10^{-7}$ à $< 10^{-6}$
1	$\geq 10^{-2}$ à $< 10^{-1}$	$\geq 10^{-6}$ à $< 10^{-5}$

4.2.2. Modes de défaillances des systèmes instrumentés de sécurité

Il existe plusieurs manières de classification des défaillances des SIS comme le montre la Figure 4.3 dérivée de [7].

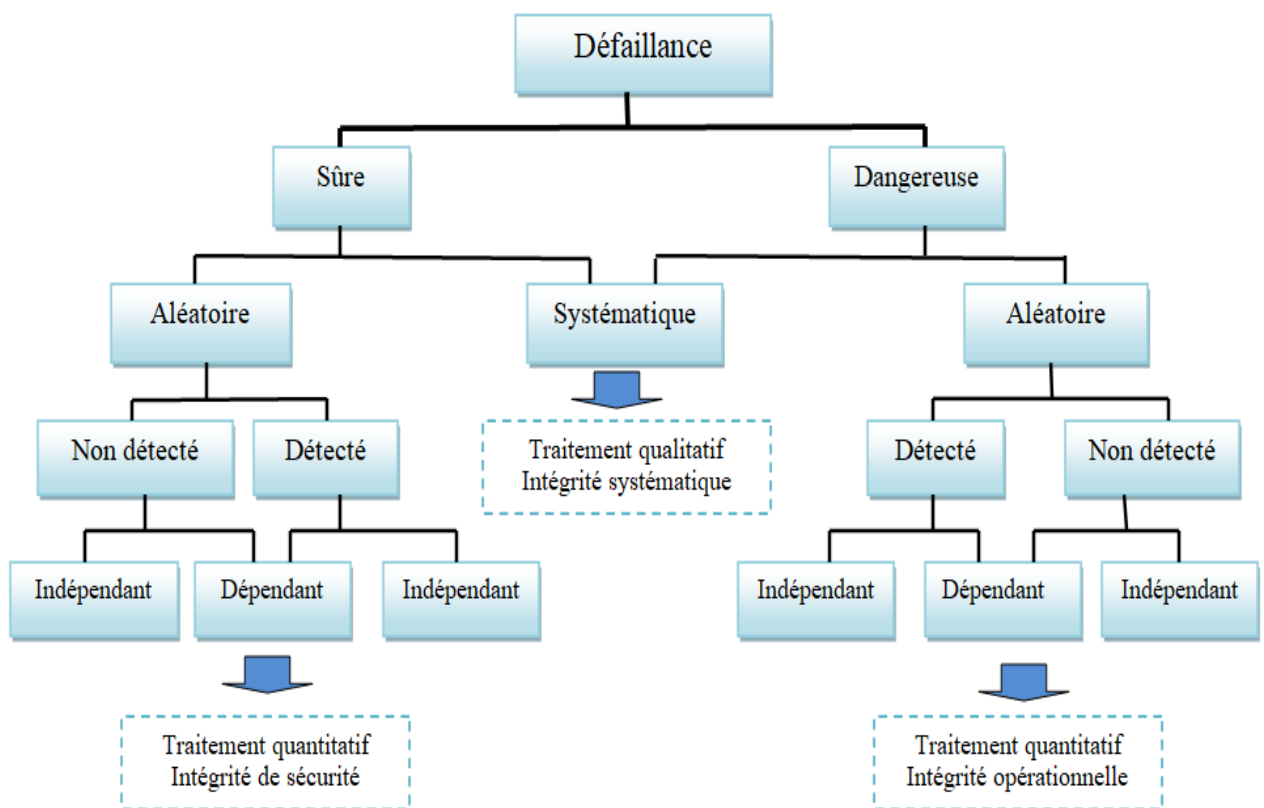


Figure 4.3: Les différents types de défaillance.

Le CEI 61508 classe les défaillances en aléatoires (physique) et systématiques (fonctionnelle). Les défaillances aléatoires surviennent de manière aléatoire suite à un ou plusieurs mécanismes de dégradation potentiels. Alors que les défaillances systématiques sont liées de façon déterministe à une certaine cause, ne pouvant être éliminée que par une modification de la conception ou du processus de fabrication, des procédures d'exploitation, de la documentation ou d'autres facteurs appropriés.

Ces défaillances aléatoires et systématiques peuvent être des défaillances sûres (safe failures) ou des défaillances dangereuses (dangerous failures). Une défaillance sûre est une

Chapitre 04 : Optimisation de la conception des systèmes instrumentés de sécurité

défaillance intempestive qui tend à anticiper le déclenchement de la fonction de sécurité, en l'absence de toute demande, en conduisant effectivement l'EUC dans un état sûr (pour plus d'information voir [8]). Une défaillance dangereuse est une défaillance qui tend à inhiber la fonction de sécurité en cas de demande émanant de l'EUC qui sera alors dans un état dangereux.

Donc le taux de défaillance aléatoire du matériel total λ_T comporte deux composantes :

$$\lambda_T = \lambda_S + \lambda_D \quad (4.1)$$

λ_S : Taux de défaillance aléatoire sûre du matériel.

λ_D : Taux de défaillance aléatoire dangereuse du matériel.

Par ailleurs, les notions de teste en ligne et les tests périodiques nous font distinguer deux classes : les défaillances détectées (detected failures) et les défaillances non-détectées (undetected failures).

La somme des taux des défaillances sûres détectées et non-détectées représente le taux de défaillances sûres (λ_S) :

$$\lambda_S = \lambda_{SD} + \lambda_{SU} \quad (4.2)$$

λ_{SD} : Taux de défaillance aléatoire en sécurité du matériel détectée.

λ_{SU} : Taux de défaillance aléatoire en sécurité du matériel non détectée.

La somme des taux de défaillances dangereuses détectées et non-détectées donne le taux de défaillances dangereuses (λ_D) :

$$\lambda_D = \lambda_{DD} + \lambda_{DU} \quad (4.3)$$

λ_{DD} : Taux de défaillance aléatoire dangereuse du matériel détectée.

λ_{DU} : Taux de défaillance aléatoire dangereuse du matériel non détectée.

Le schéma suivant est classiquement présenté pour résumer ces classifications :

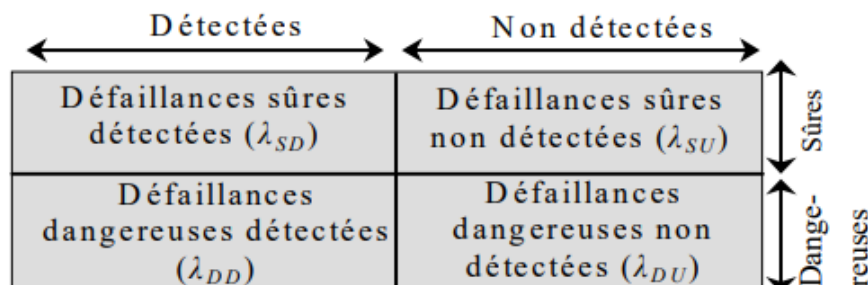


Figure 4.4:Répartition des défaillances et de leurs taux [9].

L'aptitude d'un SIS à détecter ces défaillances "en ligne" se résume dans sa couverture de diagnostic DC (Diagnostic Coverage). Ce paramètre donne :

$$\lambda_{DD} = DC \cdot \lambda_D \quad (4.4)$$

$$\lambda_{DU} = (1-DC) \cdot \lambda_D \quad (4.5)$$

$$\lambda_{SD} = DC_S \cdot \lambda_S \quad (4.6)$$

$$\lambda_{SU} = (1-DC_S) \cdot \lambda_S \quad (4.7)$$

Ici, DC représente la couverture de diagnostic des défaillances dangereuses et DC_S représente celle des défaillances sûres.

Il existe aussi des défaillances qui peuvent affecter simultanément tous les canaux constitutifs d'une architecture redondante qui sont les "défaillances de cause commune" (DCC ou CCF pour Common Cause Failure). Ces défaillances sont des résultats d'un ou plusieurs événements qui provoquent des défaillances simultanées de deux ou plusieurs canaux séparés dans un système multi-canal conduisant à la défaillance du système. Le modèle du facteur β est généralement utilisé dans ce cadre :

$$\lambda_x^{ind} = (1-\beta_x) \cdot \lambda_x \quad (4.8)$$

$$\lambda_x^{CCF} = \beta_x \cdot \lambda_x \quad (4.9)$$

$$\lambda_x = \lambda_x^{ind} + \lambda_x^{CCF} \quad (4.10)$$

où pour $x = \{DD, DU, SD, SU\}$:

β_x : Fraction constante des DCC ;

λ_x^{ind} : Taux de défaillance indépendant ;

λ_x^{CCF} : Taux de défaillance de cause commune.

4.2.3. Formules généralisées relatives à la performance des systèmes instrumentés de sécurité

Les performances probabilistes d'une fonction de sécurité, assurées par un SIS donné, sont déterminées par le calcul et la combinaison des performances de ses trois sous-systèmes (S, LS et FE). Ceci peut être exprimé par les formules suivantes :

$$PFD_{avg}^{SIS} \approx PFD_S + PFD_{LS} + PFD_{FE} \quad (4.11)$$

$$PFH_{SIS} \approx PFH_S + PFH_{LS} + PFH_{FE} \quad (4.12)$$

$$PFS_{avg}^{SIS} \approx PFS_S + PFS_{LS} + PFS_{FE} \quad (4.13)$$

$$STR_{SIS} \approx STR_S + STR_{LS} + STR_{FE} \quad (4.14)$$

Plusieurs contributions ont été apportées pour quantifier ces mesures à l'aide de différentes méthodes, y compris les arbres de défaillances, les modèles de Markov, les réseaux de Petri, les expressions analytiques, etc. Ces dernières ont fait l'objet de nombreuses références telles que la norme CEI 61508 qui fournit des expressions analytiques liées à la PFD_{avg} et la PFH pour seulement quelques architectures KooN de base. La norme ISA [10] fournit également des expressions analytiques pour la PFD_{avg} et le STR pour plusieurs architectures KooN typiques. L'organisation norvégienne SINTEF [11] fournit des formulations pour la PFD_{avg} ,

PFH et STR ainsi que des équations simplifiées pour ces indicateurs liés à des architectures KooN communes. Une généralisation des équations PFD_{avg} est fournie par ISA [12]. On trouve également des formulations analytiques généralisées développées dans [1, 13] pour les quatre indicateurs quantitatifs de performance, qui sont détaillées dans [14] comme décrit ci-dessous :

$$PFD_{avg}(KooN) = A_N^{N-K+1} \lambda_{Dind}^{N-K+1} \prod_{i=1}^{N-K+1} MDT_{looi} + \lambda_{DUCCF} \cdot \left(\frac{T_1}{2} + MRT \right) + \lambda_{DDCCF} \cdot MTTR \quad (4.15)$$

$$PFH(KooN) = A_N^{N-K+1} \lambda_{Dind}^{N-K+1} \prod_{i=1}^{N-K} MDT_{looi} + \lambda_{DUCCF} + \lambda_{DDCCF} \quad (4.16)$$

$$PFS_{avg}(KooN) \approx A_N^K \lambda_{Sind}^K \cdot MDT_{SD} \left[\prod_{i=1}^{K-1} MDTS_{looi} \right] + [\beta_{SU} \lambda_{SU} + \beta_{SD} \lambda_{SD}] \cdot MDT_{SD} \quad (4.17)$$

$$STR(KooN) = A_N^K \lambda_{Sind}^K \cdot \left[\prod_{i=1}^{K-1} MDTS_{looi} \right] + [\beta_{SU} \lambda_{SU} + \beta_{SD} \lambda_{SD}] \quad (4.18)$$

Avec :

$$A_N^{N-K+1} = \frac{N!}{(K-1)!} \quad (4.19)$$

$$MDT_{looi} = \frac{\lambda_{DUind}}{\lambda_{Dind}} \cdot \left(\frac{T_i}{i+1} + MRT \right) + \frac{\lambda_{DDind}}{\lambda_{Dind}} \cdot MTTR \quad (4.20)$$

$$MDTS_{looi} = \frac{\lambda_{SUind}}{\lambda_{Sind}} \cdot \left(\frac{T_i}{i+1} + MRT_S \right) + \frac{\lambda_{SDind}}{\lambda_{Sind}} \cdot MTTR_{SD} \quad (4.21)$$

4.3. Analyse coût-efficacité de la conception des systèmes instrumentés de sécurité

Plusieurs contributions ont été apportées dans le cadre de l'optimisation des performances des SIS. Torres echeverria [15] a proposé deux stratégies d'optimisation des SIS : la 1^{ère} stratégie traite l'optimisation de la conception de SIS, et la 2^{ème} stratégie traite l'optimisation de la maintenance et la politique de test. Cela englobe l'optimisation de la conception par la redondance et l'allocation de fiabilité, l'utilisation de la redondance diversifiée, l'inclusion des systèmes de vote KooN et l'optimisation des tests de fréquence et de stratégies. On trouve aussi dans ce travail un modèle pour la quantification de PFD, STR, LCC et l'intègre dans l'optimisation multi-objectifs par les algorithmes génétiques.

De plus, Innal et al [1] a concentré sur l'optimisation de la conception de l'architecture des SIS. Cette optimisation multi-objectif est basée sur les nouvelles formulations développées sous un ensemble de contraintes : PFD_{avg} , STR, le coût d'achat et le coût de test. Silvana et al [16] a traité l'optimisation d'un SIS d'une colonne de distillation en fonction de la fiabilité, de la disponibilité, de l'entretien, de la sécurité, en plus des coûts à l'aide de l'algorithme duelliste. En outre, Touaher [17] a étudié l'amélioration des SIS au stade opérationnel où le modèle proposé a pour objectif la minimisation de la PFD_{avg} et le STR ainsi que le LCC_T et

Chapitre 04 : Optimisation de la conception des systèmes instrumentés de sécurité

le CM en agissant sur la politique de maintenance d'une part, et sur le vote de l'architecture d'un SIS d'une autre part.

La norme CEI 61508 exige un certain niveau minimal d'intégrité de sécurité. Pour cela, dans la phase de conception du SIS, il faut atteindre ce niveau. Pour clarifier l'idée, supposons un EUC (ex. : réservoir, système de compression, etc.). Afin de réduire le risque à un niveau tolérable, il faut mettre en place un système instrumenté de sécurité. Le problème à résoudre est la conception de ce système, qui se compose, comme nous l'avons dit précédemment, de trois sous-systèmes : capteur(s), unité(s) logique(s) et élément(s) terminal (aux). Pour atteindre cet objectif de concevoir un système automatique optimal garantissant la réduction des risques au niveau requis, les trois objectifs suivants sont pris en compte dans l'approche que nous proposons dans ce travail :

- La PFD_{avg} ou la PFH qui sont les mesures de base pour déterminer le SIL (intégrité de sécurité) du système.
- Le STR : qui représente la possibilité de perdre la production (intégrité opérationnelle ou de production), et donc des valeurs élevées peuvent entraîner une perte de confiance dans le système.
- Coût du cycle de vie (LCC) : qui couvre l'ensemble du cycle de vie du SIS. Ces coûts sont expliqués en détail par Berrah, F et al [18].

Donc il s'agit d'un problème multi-objectif qui vise à minimiser ces trois objectifs. La résolution de ce problème nécessite de déterminer les valeurs appropriées du vecteur de décision x qui représente le problème de codage.

$$x = [N_s, K_s, S_{type}, S_{T1}, N_{LS}, K_{LS}, LS_{type}, LS_{T1}, N_{FE}, K_{FE}, FE_{type}, FE_{T1}] \quad (4.22)$$

Où N et K définissent l'architecture $KooN$ spécifiée pour chaque sous-système (S , LS , FE), le "type" représente sa signification au sens du type de composant, et $T1$ est l'intervalle de test périodique.

Supposons à ce niveau qu'un SIL requis d'ordre 3 est déterminé pour cette application. Donc on peut écrire ce problème comme suit :

$$\begin{cases} Y = F(X) = (PFD_{avg}(X); STR(X); LCC(X)) \\ PFD_{avg} \leq 10^{-3} \\ K_1 \leq N_1 ; K_2 \leq N_2 ; K_3 \leq N_3 \end{cases} \quad (4.23)$$

Les données utilisées dans l'application originale de [14] en plus de certains facteurs supplémentaires sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau 4.2: Les données d'entrée.

Data	Types of components: $\lambda_{10-6(h)}$; MTTR(h); $C_P(u)$; $C_T(u)$; $\beta_{DU}=\beta=\beta_{SU}=2\beta_D=2\beta_{SD}$			T1(h)
	Type 1	Type 2	Type 3	
Sous-système	Type 1	Type 2	Type 3	
PT N1Max=5	$\lambda_D=0.151$	$\lambda_D=1.9$	$\lambda_D=4.11$	4380 8760 13140 17520
	DC=0.318	DC=0.51	DC=0.1	
	$\lambda_S=0.383$	$\lambda_S=2.16$	$\lambda_S=6.81$	
	DC _S =0.692	DC _S =0.56	DC _S =0.1	
	$\beta = 0.02$	$\beta = 0.02$	$\beta = 0.02$	
	MTTR _{DD} =4	MTTR _{DD} =8	MTTR _{DD} =10	
	MTTR _{SD} =8	MTTR _{SD} =10	MTTR _{SD} =10	
	C _P =4844 C _T =60	C _P =2306 C _T =30	C _P =500 C _T =20	
LS N2Max=3	$\lambda_D=0.01$	$\lambda_D=10$	$\lambda_D=15$	8760 13140 17520
	DC=0.9	DC=0.9	DC=0.67	
	$\lambda_S=0.01$	$\lambda_S=10$	$\lambda_S=15$	
	DC _S =0.2	DC _S =0.2	DC _S =0.2	
	$\beta = 0.01$	$\beta = 0.01$	$\beta = 0.01$	
	MTTR _{DD} =4	MTTR _{DD} =8	MTTR _{DD} =8	
	MTTR _{SD} =4	MTTR _{SD} =8	MTTR _{SD} =10	
	C _P =4000 C _T =70	C _P =2800 C _T =50	C _P =2000 C _T =40	
SDV N3Max=4	$\lambda_D=3.35$	$\lambda_D=5.44$	$\lambda_D=7.9$	4380 8760 13140 17520
	DC=0.25	DC=0.20	DC=0.1	
	$\lambda_S=3.94$	$\lambda_S=3.17$	$\lambda_S=9.17$	
	DC _S =0	DC _S =0	DC _S =0	
	$\beta = 0.02$	$\beta = 0.05$	$\beta = 0.1$	
	MTTR _{DD} =8	MTTR _{DD} =8	MTTR _{DD} =10	
	MTTR _{SD} =8	MTTR _{SD} =10	MTTR _{SD} =15	
	C _P =6940 C _T =90	C _P =6500 C _T =70	C _P =6000 C _T =60	
<p>Conception/installations/mise en service PLC = 500 (u) Réparation PLC = 500 (u/événement) Temps d'arrêt (Shut down time) = 24(h) Maintenance PLC =150 (u/événement) Conception de l'instrumentation globale = 2000(u) Installation/mise en service par instrument =300(u) Maintenance par instrument =70 (u/événement) Coût de réparation par instrument et PLC = 200 (u/événement) Coût de perte de production = 2000(u/h) Durée de vie du SIS=15 ans R=4% Période de garantie = 1 an pour chaque composant DF = 10</p>				

4.3.1. Utilisation des algorithmes génétiques pour résoudre le problème de conception

4.3.1.1. Présentation des algorithmes génétiques

Les algorithmes génétiques (AG) appartiennent à la classe des algorithmes évolutifs (AE). Cet algorithme a été développé par John Holland à la fin des années 1960 à l'Université du Michigan [19]. Il est inspiré du processus de sélection naturelle qui dépend de facteurs à profil biologique tel que la mutation, le croisement et la sélection.

Sur la base des descriptions des références [20,21], le principe de l'algorithme peut s'exprimer comme suit :

L'AG commence par un ensemble initial des solutions aléatoires appelé *population initiale* et c'est avoir créé le *codage*, et l'utilisateur est le responsable de déterminer le nombre d'individus. Chaque individu de la population représenté par un *chromosome* représentant une solution au problème posé (les chromosomes sont constitués d'ADN qui porte les gènes représentés par une chaîne de symbole). Les individus évoluent à travers des itérations successives appelés *générations*. D'une génération à l'autre les chromosomes ou les individus sont évalués à l'aide de certaines mesures représentée par *la fonction objectif*. Pour créer la génération suivante (les enfants), la génération précédente subit le processus de reproduction :

- ✓ Soit en fusionnant deux chromosomes à l'aide d'un opérateur de *croisement* (le croisement est effectué selon une probabilité assignée P_c généralement assez élevée et les points de passage sont choisis au hasard).
- ✓ Soit une modification aléatoire de tout gène de chromosome à l'aide d'un opérateur de *mutation* (la mutation est effectuée selon une très faible probabilité).

Une nouvelle génération est formée en *sélectionnement*, selon les valeurs de fitness, certains parents et enfants sont acceptés et d'autres non pour s'assurer que la taille de la population reste constante (*la sélection* est une procédure stochastique qui respecte en général le principe suivant : plus un individu est compétent, plus sa probabilité de sélection est élevée. A ce titre plusieurs méthodes ont été élaborées comme : sélection par rang, sélection par tournoi, sélection uniforme, sélection par roulette, etc.).

Après plusieurs générations, jusqu'à ce qu'une condition de fin soit atteinte : le nombre maximal de générations, le temps de calcul maximal, etc., les AG convergent vers le meilleur chromosome, ce qui nous l'espérons représente une solution optimale au problème.

Alors la réalisation de l'AG pour la résolution des problèmes d'optimisation consiste à développer les différentes étapes selon le processus suivant :

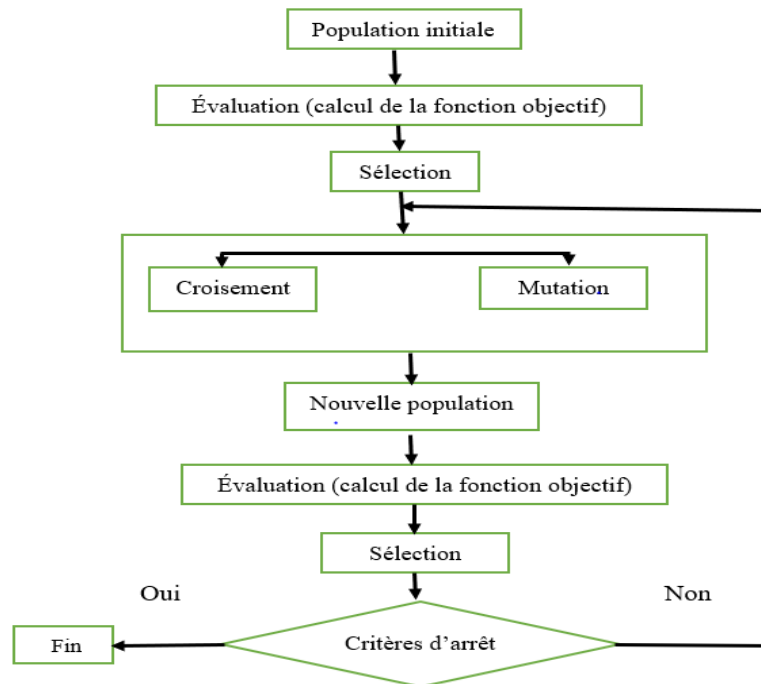


Figure 4.5: Organigramme d'un algorithme génétique [22].

Les problèmes de la vie réelle sont généralement des *problèmes multi-objectifs* (MOP) dans le sens où ce sont des problèmes visant à minimiser ou maximiser simultanément plusieurs critères définis dans le même espace.

Fonseca et Fleming [23] ont développé le premier AG multi-objectif (MOGA) qui représente la version modifiée de l'AG simple. Le MOGA diffère du AG en termes d'attribution de fonction de fitness mais les étapes restantes sont similaires. Le motif principal de l'AG multi-objectif est de générer *le front de Pareto optimal* dans l'espace objectif de telle manière qu'aucune autre amélioration de toute fonction de fitness ne perturbe les autres fonctions de fitness. Dans la plupart des problèmes d'optimisation, les objectifs sont contradictoires. Par conséquent, les objectifs doivent être compromis d'une manière ou d'une autre, pour cela on trouve les concepts d'optimalité Pareto et de dominance qui permettent de comparer et de hiérarchiser les solutions. Pour plus de détails sur les MOP et les MOGA, le lecteur peut se référer à [20].

4.3.1.2. Application des algorithmes génétiques

Pour cette application, MATLAB est utilisé qui fournit une boîte à outils d'optimisation avec un solveur basé sur les AG. Cette boîte peut être démarrée en tapant "optimtool" dans la ligne de commande de MATLAB et en appuyant sur entrée, dès que la fenêtre d'optimisation

Chapitre 04 : Optimisation de la conception des systèmes instrumentés de sécurité

apparaît nous pouvons sélectionner le solveur *gamultiobj-multi objective optimization using genetic algorithm* [24].

Comme nous l'avons mentionné précédemment, le problème d'optimisation par AG repose sur deux caractéristiques [22] :

- L'optimisation d'une fonction d'objective (l'équation 4.23).
- Le codage de problème se forme d'un chromosome : chaque configuration SIS codée par un chromosome composé de 12 gènes comme le montre la Figure 4.6, et chaque gène représente une variable de décision.

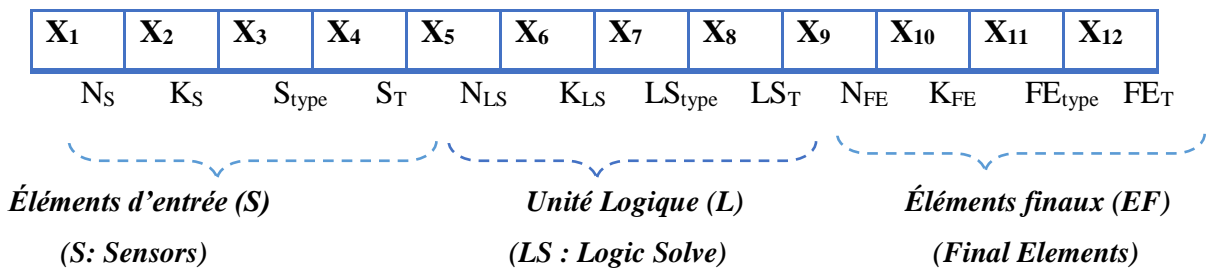


Figure 4.6: Codage des solutions SIS (les chromosomes SIS).

Les gènes de ce chromosome (les variables) prennent des valeurs variables entre les bornes inférieures (lower) définies par le vecteur suivant : [1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1], et entre les bornes supérieures (upper) définies par le vecteur [5 5 3 4 3 3 3 3 3 4 4 3 4].

Le vote KooN est exprimé par les inégalités linéaires suivantes (sous la forme $A \cdot x \leq b$: A est une matrice et b est un vecteur) :

$$-X_1 + X_2 \leq 0 ; -X_5 + X_6 \leq 0 ; -X_9 + X_{10} \leq 0 ; \quad (4.24)$$

Après avoir défini à la fois le nombre de variable, les inégalités linéaires et les bornes inférieures et supérieures nous invoquons la fonction objective @SIS_opt et la fonction de contrainte non linéaire @SIS_opt_cont.

Les paramètres utilisés sont : la taille de la population (150), type de sélection (Tournoi), fonction de croisement (deux points), fraction de croisement (0,8), fonction de mutation (adaptative faisable) et critère d'arrêt (nombre maximum de génération=200).

Le Tableau 4.3 donne quelques solutions non dominées, et leurs valeurs relatives pour les trois objectifs évalués sont également incluses (front de Pareto). La Figure 4.7 montre le front de Pareto lié aux différents objectifs étudiés donnés dans une présentation 2D (PFD_{avg} et STR ; PFD_{avg} et coût ; STR et coût) et dans une présentation 3D (PFD_{avg}, STR et coût). Compte tenu du Tableau 4.3, les décideurs pourraient faire un choix quant à la conception

Chapitre 04 : Optimisation de la conception des systèmes instrumentés de sécurité

du SIS à retenir sur la base des valeurs de préférences subjectives et d'échanges commerciaux et les compromis par rapport aux objectifs envisagés.

Tableau 4.3: Quelques solutions du front de Pareto de l'algorithme AG.

N	Variables												Objectif		
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀	X ₁₁	X ₁₂	PFD_{avg}^{SIS}	$STR_{avg}^{SIS} (h^{-1})$	Coût
01	2	1	1	1	2	1	1	2	3	1	1	1	1,1549E-4	1,2963E-5	1,2301E+5
02	4	1	1	1	3	1	1	1	4	1	1	1	1,1508E-4	1,8109E-5	1,8026E+5
03	1	1	1	1	1	1	1	2	3	2	2	2	9,2452E-4	1,1241E-6	5,0254E+4
04	4	3	1	1	2	2	1	1	4	3	1	1	3,6093E-4	8,836E-8	8,876E+4
05	4	1	1	1	3	1	1	1	4	2	1	1	1,11637E-4	3,0578E-6	1,0989E+5
06	4	3	2	2	1	1	1	2	3	2	1	1	4,4757E-4	3,1871E-7	5,9589E+4
07	3	2	2	2	1	1	1	2	3	2	2	1	9,6725E-4	4,4699E-7	5,32411E+4
08	2	1	1	1	2	1	1	2	4	1	1	1	1,1517E-4	1,6824E-5	1,5159E+5
09	3	2	1	1	2	1	1	2	3	2	1	1	2,3363E-4	3,0200E-7	7,1257E+4
10	4	2	1	1	1	1	1	1	4	2	2	1	1,2077E-4	4,9038E-7	8,3391E+4
11	2	2	1	1	1	1	1	1	3	2	1	1	6,8247E-4	2,9098E-7	5,7063E+4
12	4	3	2	2	1	1	1	2	4	3	1	1	5,6590E-4	1,2655E-7	6,9285E+4
13	4	2	1	1	3	1	1	2	4	2	1	1	1,1657E-4	5,1020E-7	9,7172E+4
14	4	3	1	1	1	1	1	1	4	3	1	1	3,5653E-4	9,8270E-8	8,1558E+4
15	3	2	1	1	1	1	1	1	4	3	1	1	2,3801E-4	2,9209E-7	6,4502E+4
16	3	2	1	1	2	1	1	1	4	1	1	1	1,1530E-4	1,555E-5	1,5996E+5
17	1	1	1	1	1	1	1	1	3	2	1	2	9,2232E-4	1,1241E-6	5,0523E+4
18	3	2	2	1	1	1	1	1	3	2	2	1	8,7556E-4	3,8348E-7	5,4215E+4
19	4	3	1	2	2	2	1	1	4	2	1	1	1,3125E-4	4,7714E-7	8,7909E+4

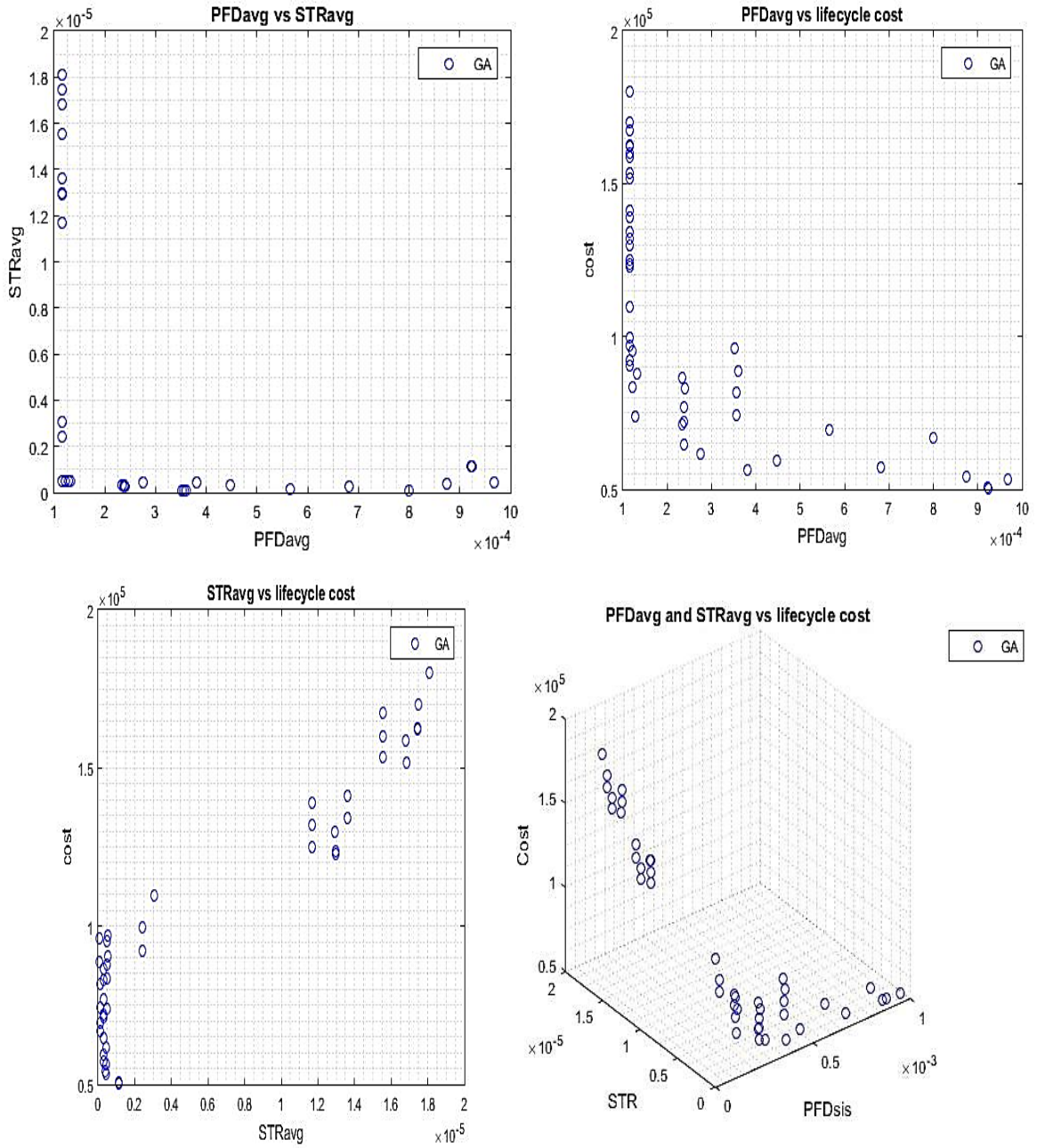


Figure 4.7: Résultats de l’algorithme AG (Pareto optimal).

4.3.2. Utilisation de l'algorithme "Manta Ray Foraging optimization" pour résoudre le problème de conception

4.3.2.1. Inspiration et principe de l'algorithme

La raie manta est l'une des plus grandes créatures marines connues. Elles sont classées parmi les Myliobatiformes et sont placées dans la famille des Myliobatidae. Elles ont le plus grand cerveau et la ration cerveau-corps de tous les poissons. La durée de vie moyenne de ces poissons est de 20 ans [25]. Ces poissons attirent l'attention et l'intérêt sur leur capacité à trouver du plancton quelles que soient les circonstances (une raie manta adulte peut manger 5 kg de plancton par jour), cela est dû à sa stratégie de recherche de nourriture unique et intelligente.



Figure 4.8:Poisson raie manta

C'est pourquoi elle a inspiré les chercheurs à créer une nouvelle méthode d'optimisation simulant le comportement coopératif observé chez la raie manta pour fournir de la nourriture. Ces poissons s'appuient sur de nombreuses stratégies pour rechercher de la nourriture, à savoir : droite, surface, chaîne, ferroustage, fond et latéralement [26]. Mais l'algorithme MRFO simule les trois méthodes de recherche de nourriture suivantes : chaîne, cyclone et saut périlleux [27] comme le montre la Figure 4.9.

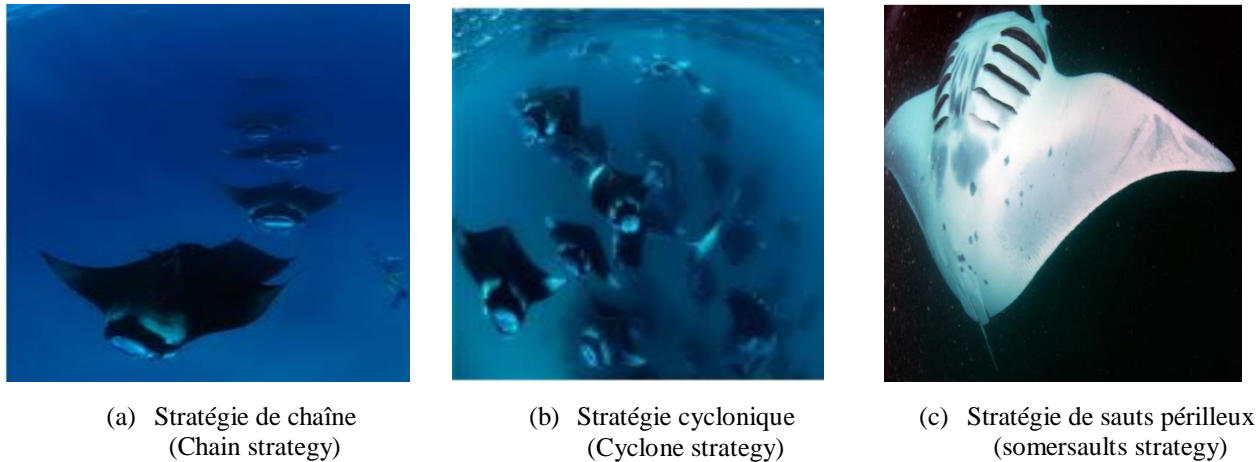


Figure 4.9: Stratégies de recherche de nourriture de la raie manta.

- Recherche de nourriture en chaîne (*Chain Foraging*) : Dans cette stratégie, un groupe de raies manta se déplace sous la forme d'une ligne organisée, alignées les unes derrière les autres, elles avancent et reculent leurs nageoires ouvertes devant leur bouche [28]. On remarque également dans ce mouvement le soutien des plus petites raies manta mâles par les femelles, en nageant sur leur ventre dorsal [29].

La première raie manta met à jour sa position (position actuelle) en fonction des meilleures solutions obtenues jusqu'à présent, tandis que le reste de la raie manta met à jour sa position actuelle en fonction de la meilleure solution et de l'emplacement de la raie manta devant elle dans la zone de recherche. Cela peut se traduire par l'équation suivante [27,30] :

$$x_i^{t+1} = \begin{cases} x_i^t + r(G_{best}^t - x_i^t) + 2 \cdot r \cdot \sqrt{|\log(r)|} \cdot (G_{best}^t - x_i^t) & i = 1 \\ x_i^t + r(x_{i-1}^t - x_i^t) + 2 \cdot r \cdot \sqrt{|\log(r)|} \cdot (G_{best}^t - x_i^t) & i = 2, \dots, N \end{cases} \quad (4.25)$$

où, r est un vecteur aléatoire dans $[0, 1]$, N est la taille de la population, x_i^t est la position de la $i^{ème}$ raie manta dans l'itération t et x_i^{t+1} est sa nouvelle position dans la prochaine itération, et G_{best} représente la meilleure solution globale au sein de l'ensemble de la population.

- ✓ Recherche de nourriture par les cyclones (*Cyclone Foraging*):

Cette stratégie est utilisée dans les endroits riches en nourriture, où des dizaines de poissons raies manta se rassemblent pour former une spirale. Le diamètre de ce cercle est proportionnel au nombre de raies manta (environ 15-20 m). Ce cyclone tourne toujours dans le sens des aiguilles d'une montre pour créer un courant qui attire les proies à l'extérieur du cercle d'alimentation vers elles [28]. Pour simuler ce mouvement, une équation en spirale est utilisée pour mettre à jour la position de la population [27,30] :

$$x_i^{t+1} = \begin{cases} G_{best} + r \cdot (G_{best}^t - x_i^t) + 2e^{r_1 \frac{T_{max}-t+1}{T_{max}}} \cdot \sin(2\pi r_1) \cdot (G_{best}^t - x_i^t) & i = 1 \\ G_{best} + r \cdot (x_{i-1}^t - x_i^t) + 2e^{r_1 \frac{T_{max}-t+1}{T_{max}}} \cdot \sin(2\pi r_1) \cdot (G_{best}^t - x_i^t) & i = 2, \dots, N \end{cases} \quad (4.26)$$

Où T_{max} est le nombre maximum d'itérations et r_1 est un nombre aléatoire dans $[0, 1]$. Afin d'améliorer la capacité exploratoire, chaque individu met à jour sa position loin de la meilleure position actuelle et selon une nouvelle position aléatoire dans toute la recherche l'espace comme suit [27, 30] :

$$x_i^{t+1} = \begin{cases} x_{rand} + r \cdot (x_{rand}^t - x_i^t) + 2e^{r_1 \frac{T_{max}-t+1}{T_{max}}} \cdot \sin(2\pi r_1) \cdot (x_{rand}^t - x_i^t) & i = 1 \\ x_{rand} + r \cdot (x_{i-1}^t - x_i^t) + 2e^{r_1 \frac{T_{max}-t+1}{T_{max}}} \cdot \sin(2\pi r_1) \cdot (x_{rand}^t - x_i^t) & i = 2, \dots, N \end{cases} \quad (4.27)$$

Où x_{rand} est un point de référence aléatoire dans l'espace de recherche donné par :

$$x_{rand} = LB + r \cdot (UB - LB) \quad (4.28)$$

LB : limite inférieure de l'espace de recherche.

UB : limite supérieure de l'espace de recherche.

✓ Recherche de nourriture en saut périlleux (*Somersault Foraging*):

Cette stratégie d'alimentation est généralement utilisée lorsque la proie est concentrée près de la surface pour limiter la mobilité et améliorer l'efficacité de l'alimentation [28]. La raie manta effectue une série de sauts périlleux vers l'arrière, qui sont des mouvements aléatoires, répétitifs, locaux et cycliques, et c'est l'une des plus belles scènes de la nature [27]. Dans cette stratégie, la raie manta met à jour sa position autour de la meilleure position trouvée jusqu'à présent en effectuant des mouvements de saut périlleux. Par conséquent, son modèle mathématique est donné par [27,30] :

$$x_i^{t+1} = x_i^t + S \cdot (r_2 \cdot G_{best} - r_3 \cdot x_i^t), \quad i = 1, \dots, N \quad (4.29)$$

S est le facteur de saut périlleux qui définit la plage de saut périlleux des raies manta et il est fixé à 2. r_2 et r_3 sont des nombres aléatoires entre 0 et 1.

Le MRFO [27] commence par créer une population aléatoire dans le domaine du problème, après cette étape, chaque individu met à jour sa position à chaque itération par rapport à l'individu devant lui ainsi que la position de référence. La valeur de t/T permet de mener des recherches exploratoires et exploitantes : pour $t/T < rand$, la meilleure solution actuelle est sélectionnée comme position de référence d'exploitation, et pour $t/T > rand$ est sélectionnée

Chapitre 04 : Optimisation de la conception des systèmes instrumentés de sécurité

comme position de référence pour l'exploration. Et selon la valeur du rand, le MRFO peut basculer entre les deux stratégies de recherche de nourriture en chaîne et de recherche de nourriture en cyclone. Ensuite, en forgeant des culbutes, les individus mettent à jour leurs positions par rapport à la meilleure position trouvée jusqu'à présent. Ces opérations et calculs sont effectués de manière interactive et s'arrêtent lorsque les conditions d'arrêt spécifiées sont remplies. Enfin, la valeur de fitness et la position du meilleur individu sont renvoyées.

Pour résoudre des problèmes multi-objectifs, nous utilisons le Multi-Objective Manta Ray Foraging Optimizer (MOMRFO) [30]. Cet algorithme utilise une archive externe pour conserver un enregistrement historique des solutions de Pareto en stockant les solutions non dominantes obtenues jusqu'à présent, cette archive est soigneusement mise à jour pour maintenir simultanément la convergence et la diversité pendant le processus d'optimisation. En fait, l'algorithme MOMRFO adopte une stratégie d'archivage efficace basée sur le mécanisme adaptatif de grille. L'algorithme MOMRFO dépend aussi de la manière de choisir la meilleure solution globale. Pour cette raison, une roulette est utilisée pour identifier la zone qui peut contenir probablement ces solutions pour améliorer à la fois la convergence et la diversité. Enfin, l'algorithme renvoie l'archive finale contenant le front de Pareto résultant.

4.3.2.2. Application de l'algorithme "Manta Ray Foraging optimization"

Dans cette section, le problème SIS est traité en utilisant l'algorithme MOMRFO. Dans ce contexte, la représentation des raies manta est une clé importante pour résoudre le problème des SIS. Par conséquent, puisque la dimension du problème SIS comprend 12 paramètres, chaque raie manta est définie dans un espace de recherche à 12 dimensions (12 positions) de sorte que chaque dimension se réfère à un paramètre donné et chaque position représente une variable de décision. Les positions de cette Raie Manta prennent des valeurs variables entre les bornes inférieures : [1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1] et les bornes supérieures : [55 3 4 3 3 3 3 4 4 3 4].

Pour obtenir un vote KooN qui représente les contraintes d'inégalité linéaire, nous utilisons la méthode de pénalité statique [31] pour guider la recherche vers des régions réalisables, en ajoutant une valeur de pénalité dans la fonction objective comme suit :

$$f_m(x) = f_m(x) + \sum_{i=1}^P P_i \cdot \max(g_i(x), 0) + \sum_{i=1}^K P_i \cdot \max(|h_i(x)| - \delta, 0) \quad (4.30)$$

Où :

$f_m(x)$, $m = 1, 2, \dots, M$ sont la fonction objectif à optimiser.

$g_i(x) \leq 0$, $i = 1, 2, \dots, P$ sont des contraintes d'inégalité.

$h_i(x) = 0$, $i = 1, 2, \dots, K$ sont des contraintes d'égalité.

Chapitre 04 : Optimisation de la conception des systèmes instrumentés de sécurité

P_i et δ sont respectivement le facteur de pénalité et la tolérance sur les contraintes d'égalité pour la considérer comme faisable.

Pour les contraintes sur la fonction objectif, $PFD \leq 10^{-3}$, cela sera réalisé en rejetant les solutions qui ne remplissent pas cette condition de l'archive externe de MOMRFO lors du processus d'optimisation.

Les paramètres utilisés sont : la taille de la population (150), le nombre maximal d'itérations (200) et la taille maximale de l'archive (100).

Un échantillon des résultats obtenus des solutions non dominantes est donné dans le Tableau 4.4 avec les valeurs des trois objectifs (front de Pareto). La Figure 4.10 montre le front de Pareto lié aux différents objectifs étudiés donnés dans une présentation 2D (PFD_{avg} et STR ; PFD_{avg} et coût ; STR et coût) et dans une présentation 3D (PFD_{avg} , STR et coût).

L'observation visuelle des Figures 4.7 et 4.10 montre que le MRFO surpasse les AG dans le nombre de solutions extraites, offrant aux décideurs de nouvelles options concernant la conception du SIS.

Tableau 4.4: Quelques solutions du front de Pareto de l'algorithme MOMRFO.

N	Variables												Objectif		
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀	X ₁₁	X ₁₂	PFD_{avg}^{SIS}	$STR_{avg}^{SIS} (h^{-1})$	Coût
01	4	1	1	1	3	1	1	1	4	2	1	1	1,1637E-4	3,0578E-6	1,0989E+5
02	3	2	1	4	1	1	1	1	3	2	1	1	2,5449E-4	2,9703E-7	6,1163E+4
03	4	2	1	1	2	1	1	1	4	1	1	1	1,1540E-4	1,1693E-5	1,3992E+5
04	3	2	2	2	1	1	1	1	3	2	1	2	8,4240E-4	7,6849E-7	7,2286E+4
05	3	2	1	2	2	2	1	2	4	2	1	1	1,3484E-4	4,8045E-7	8,0620E+4
06	3	2	2	3	1	1	1	1	3	2	1	1	5,0198E-4	5,0771E-7	5,6102E+4
07	3	1	1	1	2	1	1	1	4	2	1	1	1,1637E-4	2,4101E-6	9,2182E+4
08	3	2	1	4	2	2	1	1	4	3	1	1	3,7722E-4	9,4962E-8	7,7997E+4
09	2	1	1	1	2	1	1	1	4	1	1	1	1,1515E-4	1,6824E-5	1,5213E+5
10	5	1	1	1	3	1	1	1	4	1	1	1	1,1508E-4	1,8747E-5	1,9067E+5
11	4	3	2	2	1	1	1	1	3	2	1	1	4,4537E-4	3,1871E-7	5,9859E+4
12	3	2	2	1	1	1	1	2	3	2	1	2	7,5511E-4	5,7659E-7	5,4500E+4
13	4	1	1	1	3	1	1	1	4	1	1	1	1,1508E-4	1,8109E-5	1,8026E+5
14	3	2	1	3	1	1	1	1	3	2	1	1	2,4860E-4	2,9539E-7	6,1822E+4
15	4	3	2	2	2	1	1	1	4	3	1	1	5,5930E-4	1,3646E-7	7,7013E+4
16	4	2	1	1	3	1	1	1	3	1	1	1	1,1540E-4	1,1701E-5	1,3977E+5
17	5	3	1	1	2	2	1	1	4	2	1	1	1,2516E-4	4,7714E-7	9,8011E+4
18	5	4	1	1	3	3	1	3	4	3	1	1	3,7870E-4	8,8358E-8	1,0185E+5
19	1	1	1	1	1	1	1	1	3	2	1	1	4,6014E-4	9,2815E-7	5,2609E+4

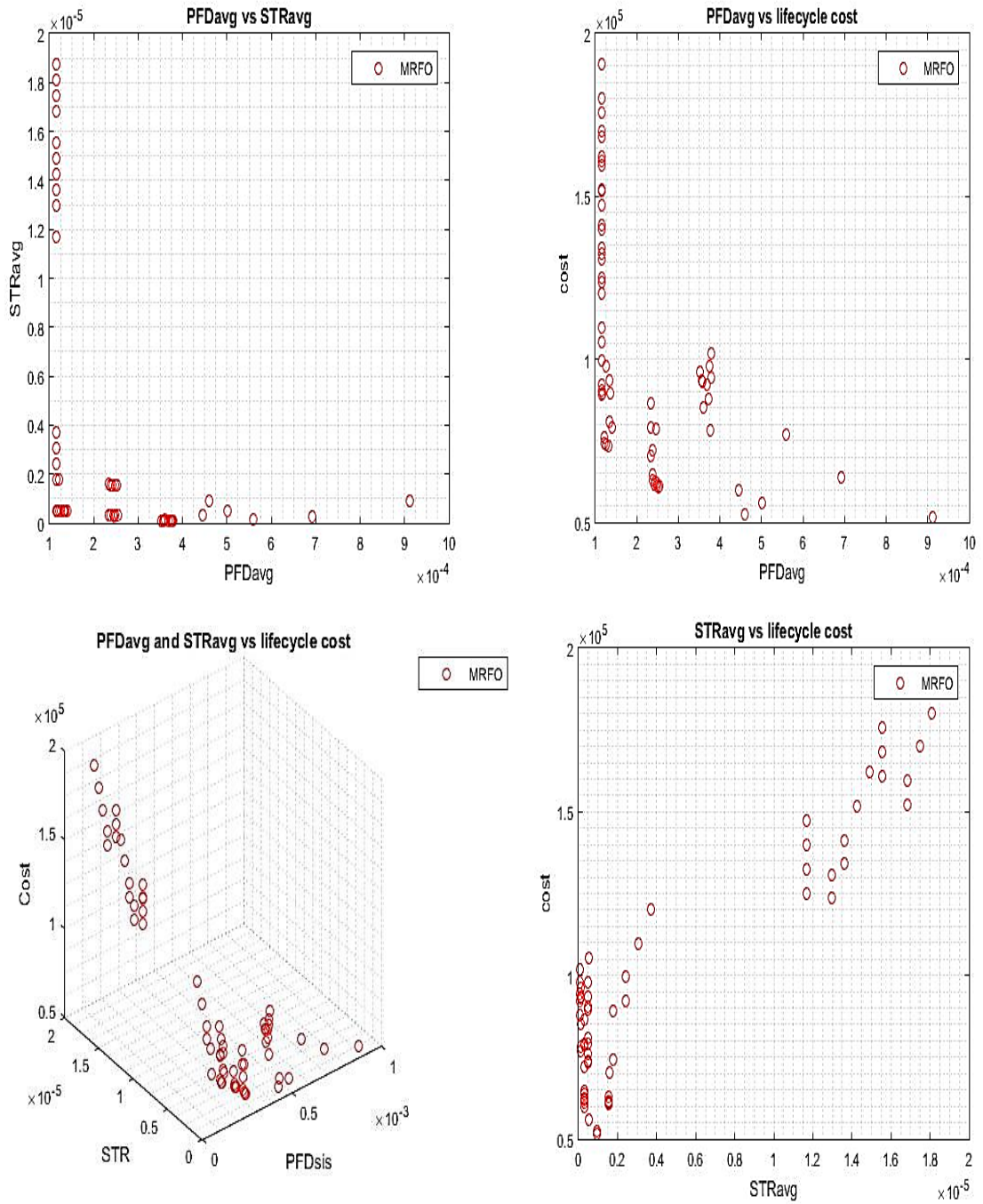


Figure 4.10: Résultats de l’algorithme MRFO (Pareto optimal).

4.4. Conception des systèmes instrumentés de sécurité dans le cadre d'analyse coût-bénéfice

Une bonne partie des risques se situe dans la zone de risque ALARP, et donc pour les traiter et les réduire, il faut prouver que les bénéfices sont proportionnels aux coûts, c'est-à-dire qu'il faut appliquer une analyse coûts-bénéfices. Là où nous pouvons trouver que les systèmes instrumentés de sécurité sont une proposition importante pour réduire ces risques, pour cette raison, nous expliquerons comment concevoir ces systèmes dans le cadre de l'analyse coûts-bénéfices.

Pour clarifier l'idée, nous suggérerons un SIS pour réduire le risque dans le cas de l'exemple donné par Health and Safety Executive (HSE) [32]. La durée de vie de l'installation est modifiée de 25 ans à 15 ans pour clarifier l'effet du temps sur la valeur des bénéfices.

Soit une installation chimique qui si elle explose conduit à :

- 20 décès ;
- 40 personnes gravement blessées à vie ;
- 100 personnes gravement blessées ;
- 200 personnes légèrement blessées.

La probabilité d'explosion est estimée à 1×10^{-5} par an ;

La durée de vie de l'installation est 15 ans ;

En utilisant un rapport sur les accidents au travail et routière en Angleterre, la HSE suggère d'utiliser : $VSL=1\ 336\ 800$ £ ;

Les blessés graves à vie = $207\ 200$ £ ;

Les blessés graves = $20\ 500$ £ ;

Les blessés légers = 300 £.

Si le risque d'explosion devait être éliminé, les avantages pourraient être évalués comme étant :

Tableau 4.5: Les avantages de l'élimination du risque d'explosion étudiés.

Décès	$20 \times 1\ 336\ 800 \times 1 \times 10^{-5} = 267,36$
Blessés à vie	$40 \times 207\ 200 \times 1 \times 10^{-5} = 82,88$
Gravement blessés	$100 \times 20\ 500 \times 1 \times 10^{-5} = 20,48$
Légèrement blessés	$200 \times 300 \times 1 \times 10^{-5} = 0,6$
Bénéfices total/an	371,32 £/an

Chapitre 04 : Optimisation de la conception des systèmes instrumentés de sécurité

$$\text{Bénéfices total} = \text{bénéfices total}/\text{an} \cdot (1 - (1 + R)^{-N}/R) \quad (4.31)$$

$$\text{Bénéfices totaux} = 371,32 (1 - (1 + 0,04)^{-15}/0,04) \approx 4130\text{£}.$$

Et selon la règle d'adoption : un projet de prévention doit être adopté à moins que le coût soit "disproportionné", le coût est disproportionné si bénéfice/coût < DF (facteur de disproportion).

La HSE ajoute qu'un facteur au-delà de 10 est improbable, donc en pratique, il pourrait raisonnable de dépenser 41300 £ pour éliminer le risque d'explosion. Alors :

Le cout total du SIS \leq 41300 £ ;

$$\text{Bénéfice} = (1 - \text{PFD}_{\text{avg}}) \cdot 1 \cdot 10^{-5} \cdot \text{DF} \cdot C_{\text{accident}} ; \quad (4.32)$$

$$\text{NAV} = \text{bénéfices} - \text{couts} \geq 0 ; \quad (4.33)$$

Lors du calcul des coûts et des bénéfices, la valeur du temps doit être respectée.

Le problème peut être écrit sous la forme suivante :

$$\begin{cases} Y = F(X) = (\text{PFD}_{\text{avg}}(X); \text{STR}(X); \text{LCC}(X); -\text{Bénéfice}(X)); \\ \text{LCC} \leq 4,13 \cdot 10^4; \\ K_1 \leq N_1; K_2 \leq N_2; K_3 \leq N_3; \\ \text{NAV} \geq 0; \end{cases} \quad (4.34)$$

Pour résoudre ce problème, nous nous appuyerons sur la méthode MOMROF de la même manière que décrit précédemment.

Le Tableau 4.6 présente quelques solutions non dominantes, et leurs valeurs relatives pour les quatre objectifs évalués. La Figure 4.11 montre le front de Pareto lié aux différents objectifs étudiés : deux par deux (PFD_{avg} et STR ; PFD_{avg} et LCC), et le front de Pareto lié aux trois objectifs (PFD_{avg} et STR_{SIS} vs LCC ; PFD_{avg} et STR_{SIS} vs bénéfice), et pour représenter ensemble les quatre objectifs mentionnés précédemment, la couleur a été utilisée pour représenter la quatrième dimension, à savoir les bénéfices (scatter plot) représentés dans la Figure 4.12.

Tableau 4.6: Quelques solutions du front de Pareto de l'algorithme MOMRFO dans le cadre de l'analyse coût-bénéfice

N	Variables												Objectif				NAV
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀	X ₁₁	X ₁₂	PFD_{avg}^{SIS}	$STR_{avg}^{SIS} (h^{-1})$	Coût	Bénéfice	
01	2	2	1	4	1	1	1	3	2	2	3	4	2,419 E-3	1,0748E-07	3,7451E+04	4,1200E+04	3,749E+03
02	1	1	1	3	1	1	1	3	2	2	1	1	7,9652 E-4	4,7180E-07	3,8519E+04	4,12671E+04	2,748E+03
03	2	2	1	1	1	1	1	3	2	2	3	4	1,0802 E-3	1,0690 E-07	3,9689E+04	4,1255E+04	1,566E+03
04	1	1	1	3	1	1	1	3	2	2	1	2	9,0658 E-4	4,7180E-07	3,6518E+04	4,12625E+04	4,745E+03
05	1	1	1	1	1	1	1	3	2	2	1	3	5,6558 E-4	4,7180E-07	3,6723E+04	4,1277E+04	4,554E+03
06	2	2	1	4	1	1	1	2	2	2	1	4	2,2347 E-3	9,4578E-08	3,9743E+04	4,1208E+04	1,465E+03
07	2	2	2	3	1	1	1	3	2	2	3	4	1,28 E-2	1,5895 E-07	3,3715E+04	4,0771E+04	7,056E+03
08	2	2	1	2	1	1	1	3	2	2	3	3	1,371 E-3	1,0709 E-07	3,8800E+04	4,1243E+04	2,443E+03
09	2	2	1	3	1	1	1	3	2	2	1	3	1,6802 E-3	9,4386E-08	4,0595E+04	4,1231E+04	6,360E+02
10	2	2	2	3	1	1	1	2	2	2	1	4	1,2588 E-2	1,4605 E-07	3,6008E+04	4,0780E+04	4,772E+03
11	1	1	1	2	1	1	1	1	2	2	1	4	8,9679 E-4	4,7180 E-07	3,5918E+04	4,12629E+04	5,345E+03
12	2	2	1	3	1	1	1	2	2	2	1	4	1,788 E-3	9,4386E-08	4,0187E+04	4,1226E+04	1,039E+03
13	1	1	1	2	1	1	1	2	2	2	1	1	3,4108 E-4	4,7180 E-07	3,9946E+04	4,12859E+04	1,334E+03
14	1	1	1	1	1	1	1	3	2	2	3	3	7,0289 E-4	4,8470 E-07	3,4467E+04	4,12709E+04	6,804E+03
15	2	2	1	2	1	1	1	2	2	2	3	2	1,2131 E-3	1,0709 E-07	3,9522E+04	4,12498E+04	1,728E+03
16	2	2	1	1	1	1	1	2	2	2	3	3	9,2232 E-4	1,0690 E-07	4,0393E+04	4,12619E+04	8,689E+02
17	2	2	2	3	1	1	1	2	2	2	1	3	1,2478 E-2	1,4605 E-07	3,6675E+04	4,07846E+04	4,109E+03
18	1	1	1	2	1	1	1	2	2	2	1	3	7,8892 E-4	4,7180 E-07	3,6315E+04	4,12674E+04	4,952E+03
19	2	2	1	4	1	1	1	3	2	2	1	4	2,2369 E-3	9,4578E-08	3,9484E+04	4,12076E+04	1,724E+03

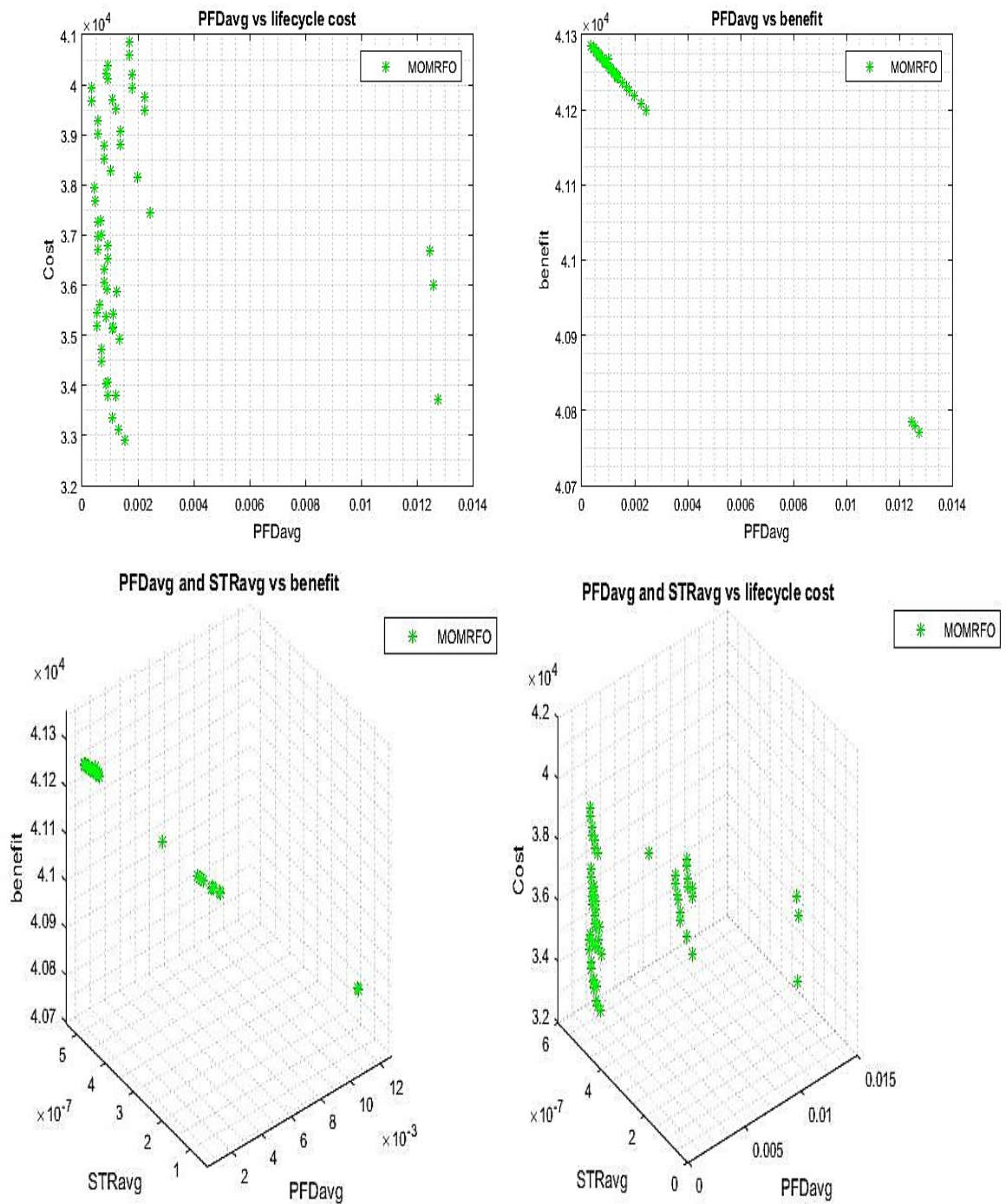


Figure 4.11: Pareto optimal dans le cadre d'analyse coût-bénéfice

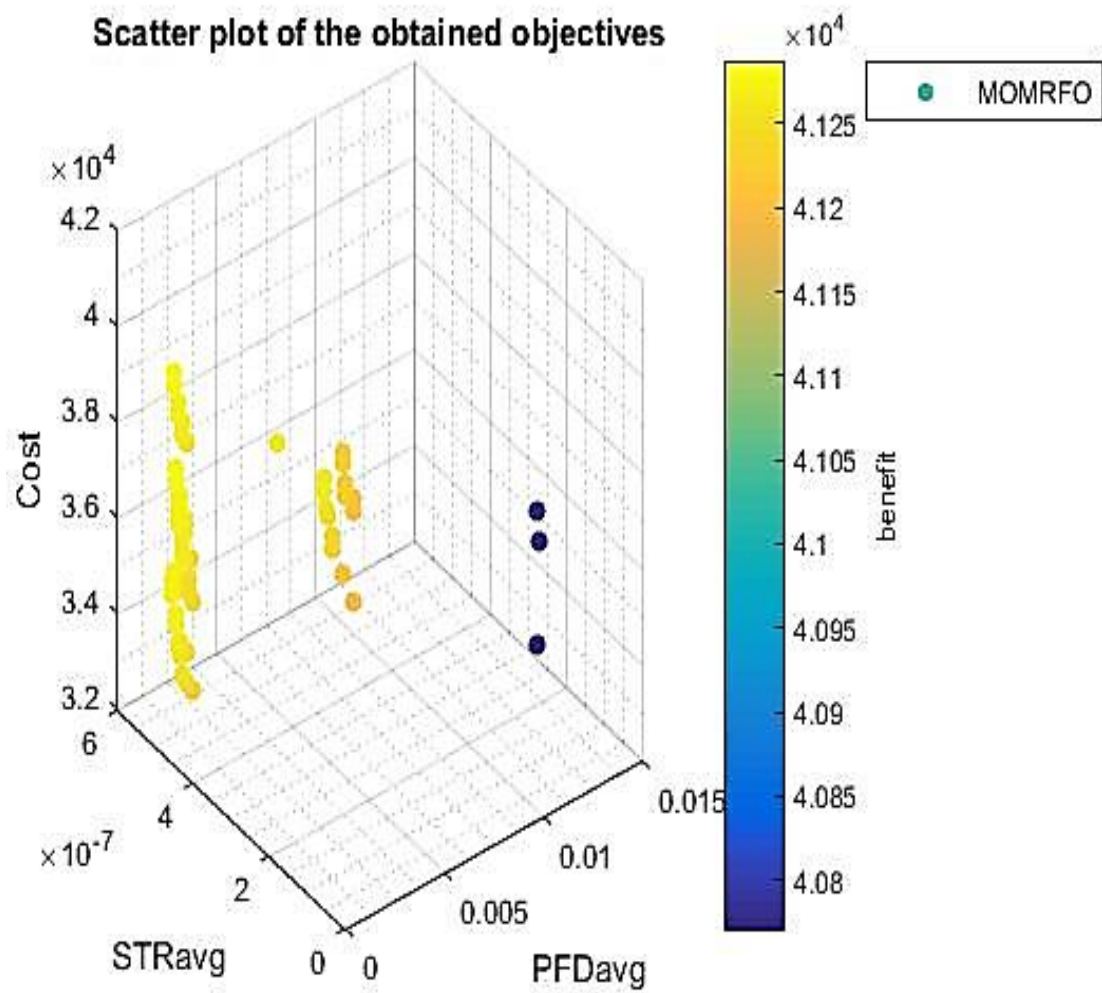


Figure 4.12: Nuage de points (Scatter plot) des objectifs obtenus

Chapitre 04 : Optimisation de la conception des systèmes instrumentés de sécurité

D'après les résultats obtenus, la solution n° 07 a le rendement financier le plus élevé, estimé à 7,056E+03. Quant au SIS qui réalise la règle de minimisation des risques autant que possible pratiquement, en considérant que le coût de l'investissement est le même que celui indiqué dans les contraintes du coût du cycle de vie, il s'agit du SIS n° 13 illustré dans la figure suivante :

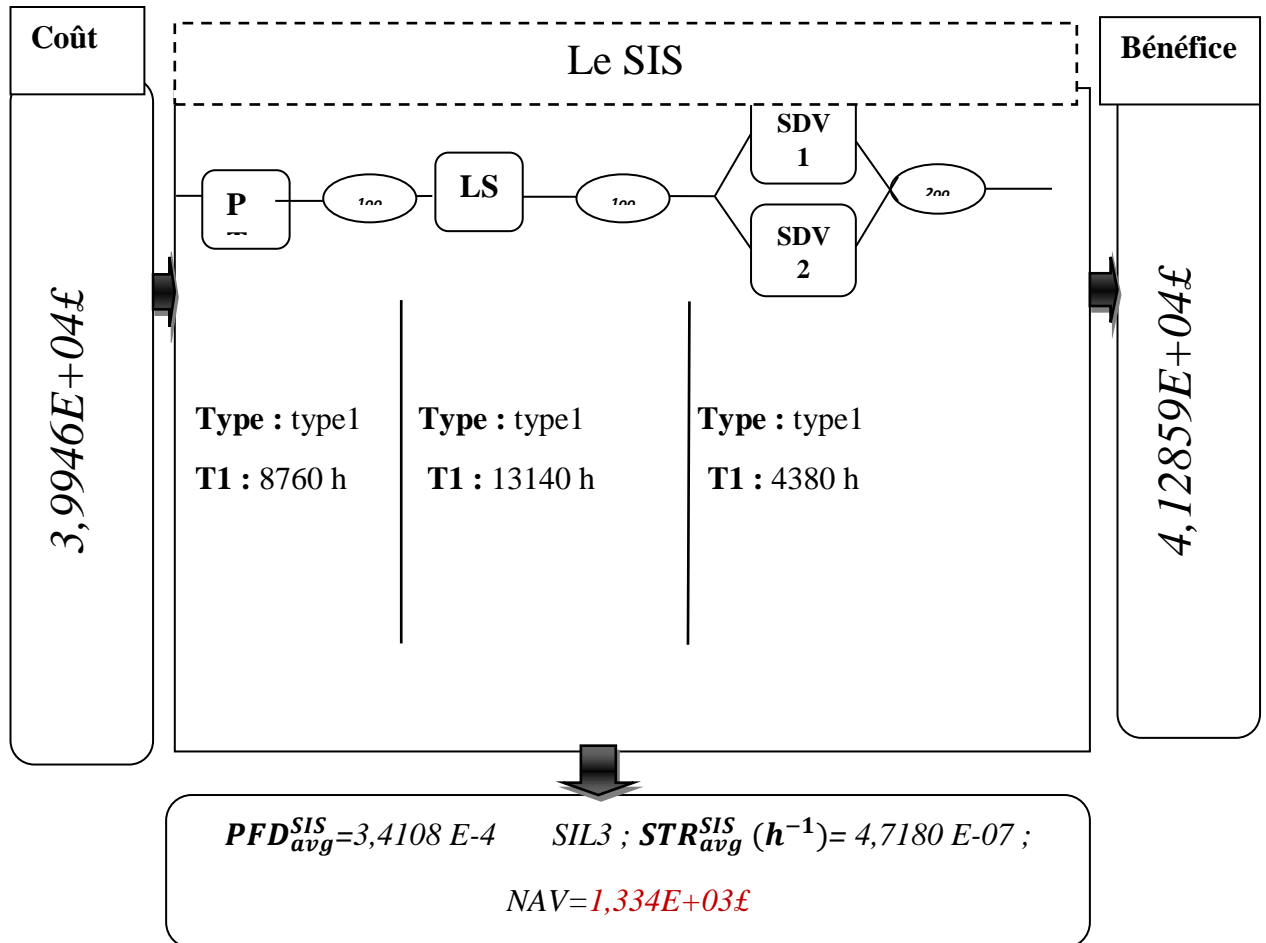


Figure 4.13:Le système instrumenté de sécurité n°13.

Il convient de noter que l'application de l'analyse coût-bénéfice est très utile pour améliorer les SIS existants.

4.5. Conclusion :

Dans ce chapitre, deux propositions ont été présentées pour la conception des systèmes instrumentés de sécurité. La première est basée sur l'analyse coût-efficacité, et la seconde sur l'analyse coût-bénéfice.

L'analyse coût-efficacité de la conception des systèmes instrumentés de sécurité vise à résoudre un problème multi-objectif pour minimiser les trois objectifs : probabilité ou fréquence de défaillance, taux de déclenchement intempestif et coût du cycle de vie. Ce chemin est illustré par un exemple général qui nécessite la fourniture d'un SIL3. Le problème a été résolu en utilisant deux méthodes méta-heuristiques. La première méthode est les algorithmes génétiques multi-objectifs qui sont un moyen courant pour résoudre ce type de problème. La deuxième méthode est le multi-objective Manta ray foraging optimization qui a donné des résultats très satisfaisants ouvrant des perspectives prometteuses pour résoudre des problèmes du monde réel avec des objectifs multiples. D'où la flexibilité et la facilité de l'application du nouvel algorithme ainsi que sa supériorité par rapport aux algorithmes génétiques en termes de nombre de solutions extraites et donc de nombre d'options accordées au décideur.

L'analyse coût-bénéfice de l'autre côté vise à trouver la conception optimale dans le cas où la réduction est principalement proportionnelle au bénéfice gagné. De tels cas sont très présents dans la plupart des installations, ce qui rend une telle analyse très utile. L'algorithme Multi-objective Manta ray foraging optimization est également utilisé pour gérer ce cas en raison des avantages associés.

Références du chapitre 04 :

- [1] Innal, F. (2008). Contribution à la modélisation des systèmes instrumentés de sécurité et à l'évaluation de leurs performances : analyse critique de la norme CEI 61508 (Doctoral dissertation, Bordeaux 1).
- [2] IEC 61508 (2010), Functional Safety of Electrical/electronic/programmable Electronic Safety Related Systems, 2nd ed., IEC 61508 Standard, Geneva.
- [3] Smith, D.J and Simpson, k.G. (2004). Functional safety: a straightforward guide to applying IEC 61508 and related standards [Book]. Elsevier Butterworth-Heinemann - 2nd edition.
- [4] IEC 61511 (2016), Functional Safety – Safety Instrumented Systems for the Process Industry Sector, 2nd ed., International Standard, Geneva.
- [5] Sklet, S. (2006). Safety barriers: Definition, classification, and performance. Journal of loss prevention in the process industries, 19(5), 494-506.
- [6] Haddad, S. (2012). Evaluation et optimisation des performances des systèmes instrumentés de sécurité pour une meilleure maîtrise des risques (Doctoral dissertation, Université de Batna 2).
- [7] CHEBILA, M. (2015). Modélisation et Evaluation des Performances des Systèmes Instrumentés de Sécurité avec Prise en Compte des Incertitudes (Doctoral dissertation, Université de Batna).
- [8] Lundteigen, M. A., &Rausand, M. (2008). Spurious activation of safety instrumented systems in the oil and gas industry: Basic concepts and formulas. Reliability engineering & system safety, 93(8), 1208-1217.
- [9] IDDIR, O. (2009). Principes d'évaluation de la probabilité de défaillance des Mesures de Maîtrise des Risques (MMR). Ed. Techniques Ingénieur.
- [10] ISA-TR84.00.02-2002. (2002) Safety instrumented functions (SIF)–safety integrity level (SIL) evaluation techniques, Part 2: Determining the SIL of A SIF via simplified equations. NC, USA: Instrumentation, Systems and Automation Society (ISA).
- [11] Hauge, S., Lundteigen, M. A., Hokstad, P., &Håbrekke, S. (2010). Reliability prediction method for safety instrumented systems–pds method handbook, 2010 edition. SINTEF report STF50 A, 6031, 460.
- [12] Oliveira, L. F., &Abramovitch, R. N. (2010). Extension of ISA TR84.00.02 PFD equations to KooN architectures. Reliability Engineering & System Safety, 95(7), 707-715.

- [13] Dutuit Yves, Innal Fares and Deconinck Geert (2009). Etude Complémentaire des Systèmes Instrumentés de Sécurité. Total, 2009.
- [14] Innal, F., Dutuit, Y. and Chebila, M. (2015), “Safety and operational integrity evaluation and design optimization of safety instrumented systems”, Reliability Engineering and System Safety, Vol. 134, pp. 32-50.
- [15] Torres-Echeverria, A. C. (2009). Modelling and optimization of Safety Instrumented Systems based on dependability and cost measures (Doctoral dissertation, University of Sheffield).
- [16] Da Costa, S., Sasanti, G. F., Musyafa, A., Soeprijanto, A., & Biyanto, T. R. (2018, July). Duelist algorithm for optimisation of safety instrumented system at distillation column based on RAMS+ C. In Safety and Reliability (Vol. 37, No. 2-3, pp. 177-193) Taylor & Francis.
- [17] Touahar, H. (2021). Développement de Stratégies de Maintenance pour la Minimisation des Activations Intempestives des systèmes instrumentés de sécurité. Doctorat thesis, Université de Batna2.
- [18] Berrah, F., Chebila, M., Innal, F., & Got, A. (2023). Cost Effective Analysis of the Design of Safety Instrumented Systems Using Manta-Ray Foraging Optimization Algorithm. International Journal of Safety & Security Engineering, 13(6).
- [19] Elegbede, C., & Adjallah, K. (2003). Availability allocation to repairable systems with genetic algorithms: a multi-objective formulation. Reliability Engineering & System Safety, 82(3), 319-330.
- [20] Gen, M., Cheng, R., & Lin, L. (2008). Network models and optimization: Multiobjective genetic algorithm approach. Springer Science & Business Media.
- [21] Katoch, S., Chauhan, S. S., & Kumar, V. (2021). A review on genetic algorithm: past, present, and future. Multimedia Tools and Applications, 80, 8091-8126.
- [22] Bendine, K. (2016), “Contribution to the study of active control of composite structures by incorporating intelligent materials”, doctoral thesis, Djillali Liabés University, SidiBel Abbas.
- [23] Fonseca, C. M., & Fleming, P. J. (1993, July). Genetic algorithms for multi-objective optimization: formulation discussion and generalization. In Icga (Vol. 93, No. July, pp. 416-423).
- [24] MATLAB, R2009 version. The MathWorks, Inc: (www.mathworks.com).
- [25] Bancroft, E. N. (1829). On the fish known in Jamaica as the sea-devil. W. Phillips.

- [26] Hemeida, M. G., Alkhalaf, S., Mohamed, A. A. A., Ibrahim, A. A., & Senjyu, T. (2020). Distributed generators optimization based on multi-objective functions using manta rays foraging optimization algorithm (MRFO). *Energies*, 13(15), 3847.
- [27] Zhao, W., Zhang, Z., & Wang, L. (2020). Manta ray foraging optimization: An effective bio-inspired optimizer for engineering applications. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 87, 103300.
- [28] Stevens, G. M. W. (2016). Conservation and population ecology of manta rays in the Maldives (Doctoral dissertation, University of York).
- [29] Rizzo, J. (2016). *Ocean Animals: Who's who in the Deep Blue*. National Geographic Books.
- [30] Got, A., Zouache, D., & Moussaoui, A. (2022). MOMRFO: Multi-objective Manta ray foraging optimizer for handling engineering design problems. *Knowledge-Based Systems*, 237, 107880.
- [31] Rao, S. S. (2019). *Engineering optimization: theory and practice*. John Wiley & Sons.
- [32] Health and Safety Executive. (2022, July 18). ALARP "check". tiré de www.hse.gov.uk/enforce/expert/alarpcheck.htm.

Chapitre 05

Priorisation des barrières de sécurité

5.1. Introduction

Dans la prise de décision, surtout face à des problèmes complexes et multifactoriels, il est nécessaire de disposer d'outils et de méthodes qui facilitent la clarification des choix et la sélection des meilleures solutions. L'une des méthodes les plus importantes qui s'est avérée particulièrement efficace dans ce contexte, est le processus hiérarchique analytique (AHP). Le processus hiérarchique analytique est une méthode organisée et systématique qui permet de hiérarchiser les critères, d'évaluer les alternatives et, finalement, de prendre des décisions éclairées.

L'incertitude fait partie intégrante des mesures et des calculs, c'est pourquoi cette section vise à clarifier l'analyse de l'incertitude en tant qu'étape importante pour la prise de décision, et qui représente l'étape finale de l'analyse coûts-bénéfices.

5.2. Processus Analytique Hiérarchique

Le processus d'analyse hiérarchique en anglais 'The Analytic Hierarchy Process (AHP)' est une méthode d'aide à la décision qui est basée sur la hiérarchisation des critères, il est considéré comme une technique structurée pour organiser et analyser les décisions complexes basée sur les mathématiques et la psychologie [1]. L'AHP a été développée par Thomas L. Saaty, mathématicien américain et spécialiste de la recherche opérationnelle, dans les années 1970, et elle est utilisée à travers le monde pour un large éventail de processus décisionnels que ce soit des décisions gouvernementales, dans le monde des affaires, de la santé, l'éducation, l'industrie...etc Parmi les articles les plus importants qui utilisent la méthode AHP on trouve : Contreras-Salinas et al [2] qui ont proposé une méthodologie en utilisant AHP pour la sélection et l'évaluation de projets en accélération de l'entreprise. Cen Zeli [3] a appliqué l'AHP pour établir un système de modèle d'évaluation pour la Wuhan Business School. Cui et coll. [4] ont introduit la paire ordonnée de nombres réels normalisés (OPNs) dans l'AHP et ils ont proposé le processus de hiérarchie analytique floue avec OPNs (OFAHP). Madzik et Falat [5] ont mené une revue systématique de la littérature assistée par ordinateur des articles sur l'AHP, identifiant les tendances et les sujets liés à l'AHP. De plus, une étude sur l'aptitude des terres à la mangue dans le district de Ratnagiri en combinant l'utilisation des méthodes MCDM avec un SIG (Système d'Information Géographique) basé sur l'AHP [6]. La référence [7] indique que l'AHP est la méthode la plus utilisée dans les processus décisionnels suivi par logique floue, Cela ressort clairement du grand nombre des documents publiés liés à cette méthode, puisque on retrouve

35 430 documents publiés entre 1980 et 2021 [5]. Ces articles fournissent des informations précieuses sur l'application et le développement de la méthode AHP dans divers domaines.

L'AHP aide les décideurs à trouver l'action qui correspond le mieux à leur objectif et à leur compréhension du problème, en autre terme elle est utilisée pour guider les processus de prise de la décision et soutenir les objectifs, les plans et les opérations de l'entreprise, en utilisant l'évaluation des critères et la priorisation.

On retrouve souvent le processus AHP en tant que fonction dans de nombreux logiciels d'analyse. Le modèle se compose de trois parties [8] :

- 1) L'objectif global ;
- 2) Alternatives et solutions possibles ;
- 3) Les critères par lesquels les solutions sont mesurées ;

La formulation du problème de décision sous la forme d'un cadre hiérarchique est la première étape de l'AHP, le niveau supérieur représentant les objectifs ou buts globaux, les niveaux intermédiaires représentant les critères et sous-critères, et les alternatives de décision étant au niveau le plus bas [9]. C'est ce que montre la figure suivante.

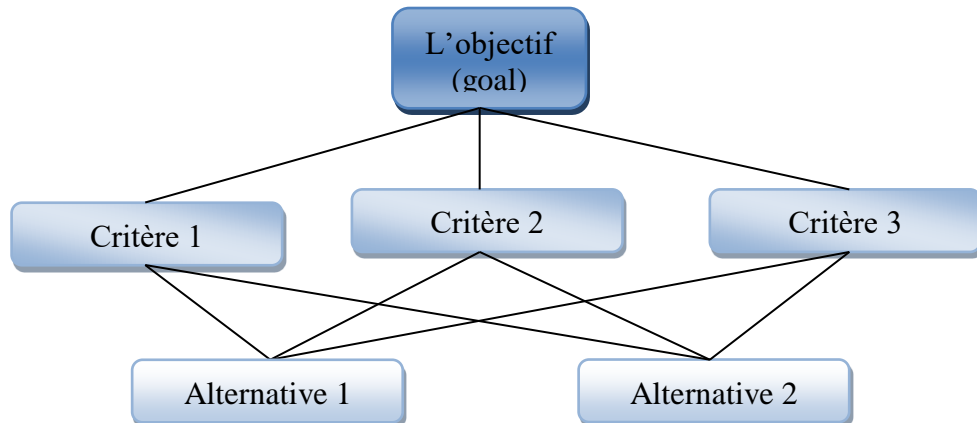


Figure 5.1:Une hiérarchie AHP simple.

D'une manière générale, l'AHP se compose de trois grands principes, à savoir le cadre hiérarchique, l'analyse des priorités et la vérification de la cohérence [9 ; 10]. Ces principes peuvent être expliqués en les structurant dans un processus en neuf étapes, comme le montre la figure (5.2), on peut résumer ces étapes comme suit :

Dans un premier temps, on définit le problème de décision et détermine les critères qui doivent être pris en compte, puis construire une structure hiérarchique qui représente le problème de décision, avec l'objectif principal en haut et les critères et alternatives en

dessous, après cela la comparaison par paires des critères et des alternatives pour déterminer leurs importances relatives à l'aide d'une échelle de préférence. Par la suite calculer les poids des critères et des alternatives sur la base des comparaisons par paires à l'aide de calculs mathématiques, et enfin agréger les poids pour obtenir un classement final des alternatives.

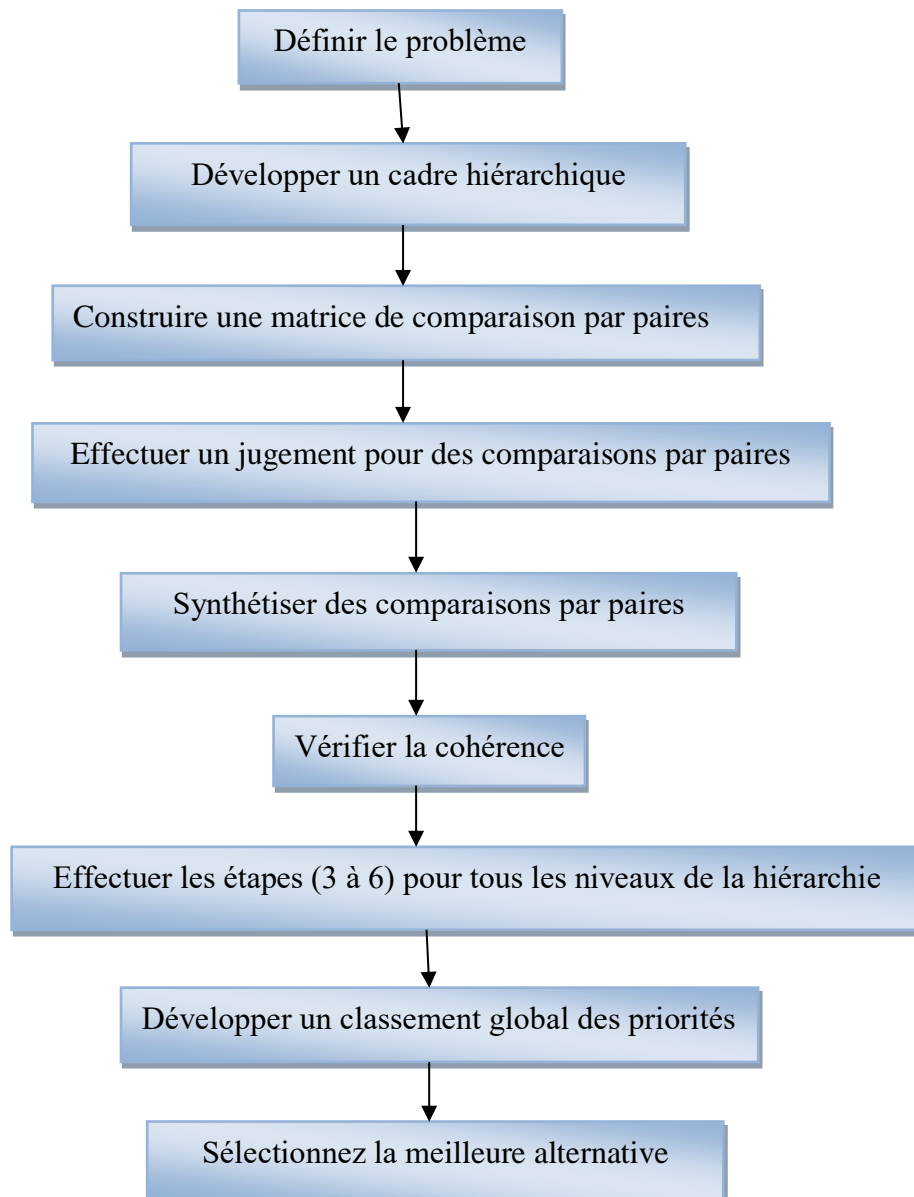


Figure 5.2: Étapes du processus AHP [9].

5.3. Théorie de base de l'AHP

L'AHP propose le concept de hiérarchie lors du traitement de problèmes liés à un certain nombre des critères et des alternatives, voir la figure (5.1).

Une fois la hiérarchie est construite, des comparaisons par paire sont effectuées à chaque niveau ; par exemple, pour déterminer laquelle de deux alternatives de décision est la plus préférée au regard d'un certain critère de décision. Une échelle numérique est attribuée à chaque paire de *n* éléments en fonction de leur impact sur un élément placé à un niveau supérieur dans la hiérarchie. Le tableau (5.1) représente la méthode de l'échelle de Saaty's [11], qui est la méthode généralement utilisée pour mesurer les opinions sur les paires exprimées à l'aide de termes linguistiques avec des nombres réels.

Tableau 5. 1:Méthode de l'échelle de Saaty's pour les comparaisons par paires. [11]

Score	Jugement verbal
1	Importance égale (IE)
3	Modéré (M)
5	Forte importance (FI)
7	Très Forte Importance (TFI)
9	Extrêmement préféré (EP)
2, 4, 6, 8	Valeurs intermédiaires (VI)

Le résultat de chaque comparaison est résumé dans une matrice dite matrice de comparaison par paires notée *A*.

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix}$$

Où *n* est le nombre d'éléments de décision à comparer. *a_{ij}* (>0) exprime le degré de préférence de l'élément *i* par rapport à l'élément *j*. Plus précisément, *a_{ij}* approxime le rapport entre deux poids : *a_{ij}*=*w_i*/*w_j* (*w_i* est une estimation du score de l'élément *i*). Donc chaque entrée *a_{ij}* dans la matrice *A* représenté l'importance relative du *i*^{ème} critère par rapport au *j*^{ème} critère, qui est caractérisé par : *a_{ij}*·*a_{ji}* = 1 ; *a_{ii}* = 1 ; *a_{ij}*> 0 ; *a_{ij}*=1/*a_{ji}* ; $\forall i,j$. Ainsi, **A** peut-être réécrit sous la forme suivante :

$$A = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ \frac{1}{a_{12}} & 1 & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{1}{a_{1n}} & \frac{1}{a_{2n}} & \dots & 1 \end{bmatrix}$$

Afin d’assurer une comparaison fiable, il est nécessaire de vérifier la cohérence de la matrice de comparaison deux à deux. Cette cohérence reflète l’homogénéité entre les différents a_{ij} . En effet, une matrice incohérente peut être un symptôme de l’inexpérience du décideur. Parmi les différentes méthodes, cette cohérence peut être déterminée en calculant le taux de cohérence (Consistency Ratio (CR)) :

$$CR = \frac{CI}{RI} \tag{5.1}$$

Où CI est l’indice de cohérence et peut être calculé sur la base de la valeur propre maximale de la matrice A, notée λ_{max} (la valeur propre avec la plus grande valeur absolue) :

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \tag{5.2}$$

Notez que la valeur propre de la matrice A sont les racines de l’équation caractéristique :

$$\det(A - \lambda I) = 0 \tag{5.3}$$

Où det signifie déterminant et I est la matrice d’identité $n \times n$.

RI est l’indice aléatoire et peut être déterminé par le tableau (5.2). En général, il faut accepter les matrices avec des valeurs $CR \leq 0,1$ [11]. Dans le cas contraire, les dispositions pourraient nécessiter certaines révisions. Une valeur de $CR = 0,1$ signifie que les jugements sont 10 % aussi incohérents que s’ils avaient été rendus au hasard [12].

Tableau 5.2: Valeurs de l’indice aléatoire (RI). [11]

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0.00	0.00	0.5247	0.8816	1.1086	1.2479	1.3417	1.4057	1.4499	1.4854

En utilisant les comparaisons par paires comme entrée (matrice A), il existe de nombreuses méthodes pour dériver les poids des différents éléments à chaque niveau : le vecteur de priorité $W = [w_1, w_2, \dots, w_n]^T$. Dans ce chapitre, w est calculé à l’aide de la méthode des vecteurs propres proposée par Saaty [13] :

$$\begin{cases} \mathbf{A} \cdot \mathbf{w} = \lambda_{max} \cdot \mathbf{w} \\ \sum_i^n w_i = 1 \end{cases} \quad (5.4)$$

Cette étape représente la portée ultime de l'AHP : utiliser des comparaisons cohérentes par paires entre les éléments comme entrée pour produire un classement des alternatives. La meilleure alternative est celle qui obtient la note la plus élevée. Ce classement, c'est-à-dire les priorités globales, est calculé en composant les priorités locales des éléments de décision. Pour la composition, une combinaison linéaire est utilisée dans ce travail (la méthode de la moyenne arithmétique pondérée) :

$$\mathbf{w} = \sum_i^n w_i \cdot \mathbf{w}_i \quad (5.5)$$

Où \mathbf{w} est le vecteur de notation global et \mathbf{w}_i représente le vecteur de notation par rapport au critère i . Le poids associé à chaque vecteur \mathbf{w}_i (w_i) est calculé sur la base de la même technique utilisée jusqu'à présent, c'est-à-dire en construisant une matrice de comparaison par paire qui compare l'importance des critères par rapport à l'atteinte de l'objectif, puis en calculant le vecteur prioritaire correspondant.

5.4. Concept d'incertitude

La notion d'incertitude est présente depuis l'Antiquité comme idée dans tous les domaines, et on retrouve les racines de ce mot dans la philosophie ancienne, notamment chez les philosophes grecs anciens, comme le philosophe Pyrrhon d'Élée, qui a discuté la nature incertaine de la connaissance humaine. On la retrouve en médecine depuis l'Antiquité pour prouver la certitude dans le diagnostic et le traitement [14]. On le retrouve aussi en économie comme concept clair, on retrouve Frank Knight soulignant les limites de la connaissance humaine, dans son livre « Risk, Uncertainty, and Profit » (1921) [15]. Ce concept s'étend au-delà des domaines scientifiques et économiques pour inclure tous les domaines de la vie. En littérature, la pièce de John Ford, *The History of Perkin Warbeck*, crée une incertitude sur l'identité de son personnage principal, en s'inspirant des œuvres de Sir Francis Bacon [16].

L'incertitude selon la rousse [17] : est un nom féminin signifie l'état de quelqu'un qui ne sait quel parti prendre, ou état plus ou moins préoccupant de quelqu'un qui est dans l'attente d'une chose incertaine. Selon [18] l'incertitude fait référence à un manque de certitude ou de conviction à l'égard de quelqu'un ou de quelque chose, allant d'un manque de certitude à un manque totale de connaissance ou de conviction à l'égard d'un résultat ou d'une issue ou d'un résultat. De manière générale, l'incertitude est un concept qui met en évidence le manque de connaissances exactes et les défis liés au traitement d'informations imparfaites.

La notion d'incertitude a évolué au fil de l'histoire, combinant des perspectives philosophique, scientifiques, mathématiques et économiques pour aboutir à une compréhension complexe de la manière dont nous traitons et quantifions l'incertitude dans divers domaines.

5.5. Analyse d'incertitude et analyse de sensibilité

L'analyse d'incertitude et l'analyse de sensibilité sont deux concepts distincts, bien qu'ils soient souvent utilisés de manière complémentaire dans la modélisation et l'analyse des données et pour obtenir une vision complète de la robustesse d'un modèle. Ils peuvent être considérés comme deux parties complémentaires sous le titre de processus d'évaluation de l'incertitude [19].

L'analyse d'incertitude est le processus d'évaluation et quantification des incertitudes associées à des données, des modèles ou des prévisions. Il étudie les effets du manque des connaissances ou des erreurs [19], ces derniers sont créés en combinant un échantillon de chaque facteur incertain de l'espace d'entrée, dans le but d'assurer une couverture satisfaisante de l'ensemble de l'espace d'entrée. L'incertitude peut être analysée à l'aide de méthodes qualitatives et quantitatives, les techniques probabilistes étant le plus fréquemment utilisées. Ces techniques, qui incluent les approches bayésiennes et la simulation de Monte Carlo, utilisent la probabilité pour quantifier l'incertitude et offrent un cadre de prise de décision. Dans les situations où les données sont rares ou peu claires, des techniques basées sur des intervalles et des jugements d'experts peuvent également être utilisées. L'analyse de l'incertitude est particulièrement cruciale dans les secteurs où il existe des dangers et des problèmes de sécurité importants, comme l'aérospatiale et l'aviation, où les risques d'événements sont évalués à l'aide d'une évaluation probabiliste des risques [20].

L'analyse de sensibilité (SA) est le processus consistant à déterminer comment les changements dans les valeurs d'entrée du modèle affectent la sortie du modèle : déterminer comment l'incertitude dans une sortie du modèle peut être répartie sur l'incertitude dans l'entrée du modèle [21]. L'analyse de sensibilité est une discipline qui quantifie la façon dont les résultats et les inférences du modèle dépendent des paramètres et des hypothèses [22]. Cette analyse est importante dans tous les domaines et recherches pour acquérir des connaissances et une certitude sur la validité de la recherche. En général, l'analyse de sensibilité est un outil précieux pour comprendre la robustesse et la fiabilité des modèles et des systèmes, et afin de prendre des décisions éclairées basées sur ses résultats. Il existe un

grand nombre d'approches pour réaliser une SA en fonction des caractéristiques du modèle utilisé (dépenses de calcul, entrées corrélées, interactions de modèle, non-linéarité, etc.). De manière générale, ces approches peuvent être regroupées en trois classes : les méthodes de criblage, les méthodes SA locales et les méthodes SA globales [21]. Notez que ces méthodes peuvent se chevaucher [19].

5.6. Gestion de l'incertitude dans les systèmes instrumentés de sécurité conformément à la norme CEI 61508 :

La norme CEI 61508 [23] stipule que le niveau d'intégrité de sécurité le plus élevé pouvant revendiquer pour une fonction de sécurité est limitée par les contraintes d'intégrité de sécurité du matériel, en mettant en œuvre l'un des deux chemins (Route 1_H, Route 2_H) :

5.6.1. Route 1H (contraintes architecturales)

Dans cette procédure, le SIL maximum revendiqué s'exprime en termes de la proportion des défaillances en sécurité (Safe Failure Fraction (SFF)), le type d'élément (A ou B) et la tolérance des anomalies (Hardware Fault Tolerance (HFT)), Comme le montre le tableau (5.3). Un HFT de M signifie que M+1 est le nombre minimum de défauts pouvant entraîner une perte de la fonction de sécurité : le système 1oo3 toléré 2 défauts (M=2). Cette procédure était le moyen exclusif de gérer l'incertitude lors de la première version l'IEC 61508.

Tableau 5.3:SIL maximum admissible pour une fonction de sécurité réalisée par un sous-système de type A ou B [23].

SFF	Type A			Type B		
	M			M		
	0	1	2	0	1	2
< 60 %	SIL 1	SIL 2	SIL 3	Non autorisé	SIL 1	SIL 2
60 % -< 90 %	SIL 2	SIL 3	SIL 4	SIL 1	SIL 2	SIL 3
90 % -< 99 %	SIL 3	SIL 4	SIL 4	SIL 2	SIL 3	SIL 4
≥99 %	SIL 3	SIL 4	SIL 4	SIL 3	SIL 4	SIL 4

Le SFF, donné par l'équation (5.6), décrit le comportement « sûr » en cas de défaillance d'un élément existant, c'est-à-dire que plus la SFF est élevée, plus le degré de confiance dans cet élément est élevé.

$$SFF = \frac{\lambda_S + \lambda_{DD}}{\lambda_S + \lambda_D} \tag{5.6}$$

L'objectif de la Route 1_H est d'obtenir une structure suffisamment solide. La référence [24] a montré que la SFF d'une entité ne représente pas sa sécurité ou sa disponibilité avec un exemple comparant deux éléments C1 et C2, pour plus d'informations, il est recommandé de se référer à cette référence.

5.6.2. Route 2_H (Propagation de l'incertitude) :

Le principe de la route 2_H s'inscrit dans la philosophie de propagation de l'incertitude, même si la notion de tolérance aux anomalies (HFT) est toujours présente. Outre ces exigences, la norme CEI 61508 (clause 7.4.4.3.3) stipule que « Si la Route 2_H est sélectionné, alors les incertitudes des données de fiabilité doivent être prises en compte lors du calcul de la mesure de défaillance cible (PFD_{avg} ou PFH) et le système doit être amélioré jusqu'à ce qu'il y ait un degré de confiance supérieur à 90 % quant à l'atteinte de l'objectif de mesure de défaillance ». Donc, le parcours 2_H est basé sur le retour d'exploitation par l'utilisateur final et concernant les données de fiabilité des composants des niveaux de confiance plus élevés et une tolérance aux anomalies du matériel (HFT) pour les niveaux d'intégrité de sécurité spécifiés. Selon ce parcours, la propagation de l'incertitude dépend de l'analyse de Monte Carlo.

5.7. Évaluation de l'incertitude par l'échantillonnage MONTE CARLO

La méthode de Monte-Carlo est une méthode algorithmique qui utilise des techniques probabilistes pour calculer une valeur numérique approchée. Elle est utilisée pour estimer des paramètres inconnus, calculer les valeurs attendues, les variances et les covariances et analyser l'incertitude [25]. Cette technique est devenue la norme de l'industrie pour propager les incertitudes [26]. L'ensemble du processus d'évaluation de l'incertitude pourrait être divisé en deux parties : l'analyse ou la propagation de l'incertitude et l'analyse de sensibilité décrites précédemment. L'évaluation de l'incertitude permet à un utilisateur du modèle d'être mieux informé sur la confiance qui peut être accordée aux résultats du modèle [27]. Le schéma général de l'étude de l'incertitude est représenté sur la figure suivante.

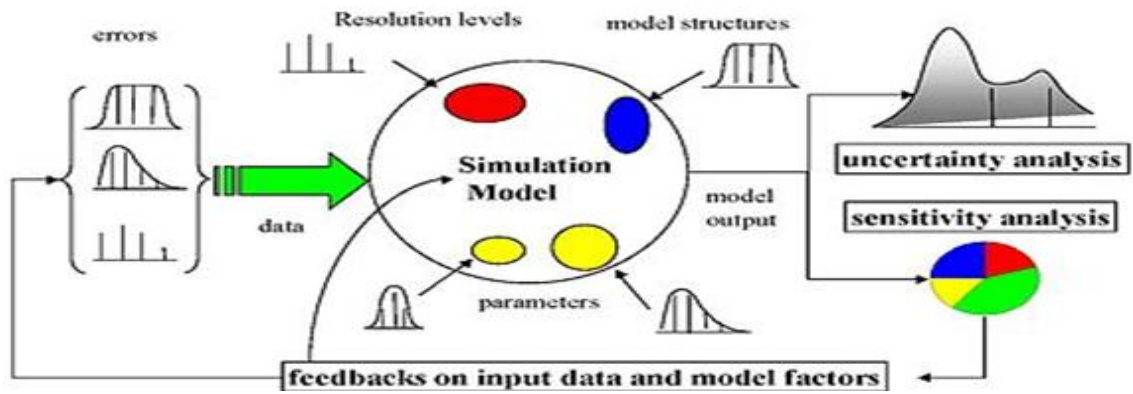


Figure 5.3: Cadre d'évaluation de l'incertitude [28]

Les principales étapes de l'analyse des incertitudes, concernant les objectifs de conception et d'amélioration des SIS, sont les suivantes :

- Construire une fonction de densité de probabilité (pdf) pour chaque paramètre d'entrée (la pdf reflète l'état des connaissances sur la valeur du paramètre).
- Générer un ensemble de valeurs de paramètres d'entrée en utilisant des nombres aléatoires (uniformément répartis entre 0 et 1) en fonction des pdf attribués à ces paramètres.
- Identifier la fonction de sortie (les objectifs d'optimisation) en utilisant l'ensemble de valeurs aléatoires ci-dessus.
- Répétez les étapes 2 à 3 n fois (jusqu'à obtenir un nombre suffisant, par exemple 1 000) en produisant n valeurs de sortie indépendantes. Ces n valeurs de sortie représentent un échantillon aléatoire de la distribution de probabilité (distribution empirique) de la fonction de sortie.
- Générer des statistiques à partir de l'échantillon obtenu pour le résultat de sortie : moyenne (\bar{X} : les objectifs d'optimisation), écart type σ , intervalle de confiance, etc.

5.8. Choisir le meilleur SIS selon la méthode AHP et le traitement d'incertitude

Cette partie a pour objectif de choisir le meilleur SIS parmi les SIS optimaux résultants décrits dans le chapitre précédent, en prenant en compte les incertitudes liées aux différents paramètres qui entrent en jeu : taux de défaillance (λ), proportion de défaillance de cause commune (β), couverture du diagnostic (DC), etc. Cela conduit à une évaluation précise et donc sûre du niveau d'intégrité de sécurité (SIL) inhérent aux fonctions de sécurité exécutées par de tels systèmes. Après ce traitement, nous passerons par l'étape des préférences entre

les critères de sélection d'une part et les solutions d'autre part, en raison des poids différents des critères parmi les décideurs, et nous utiliserons la méthode AHP.

La méthodologie proposée est organisée comme le montre la figure suivante :

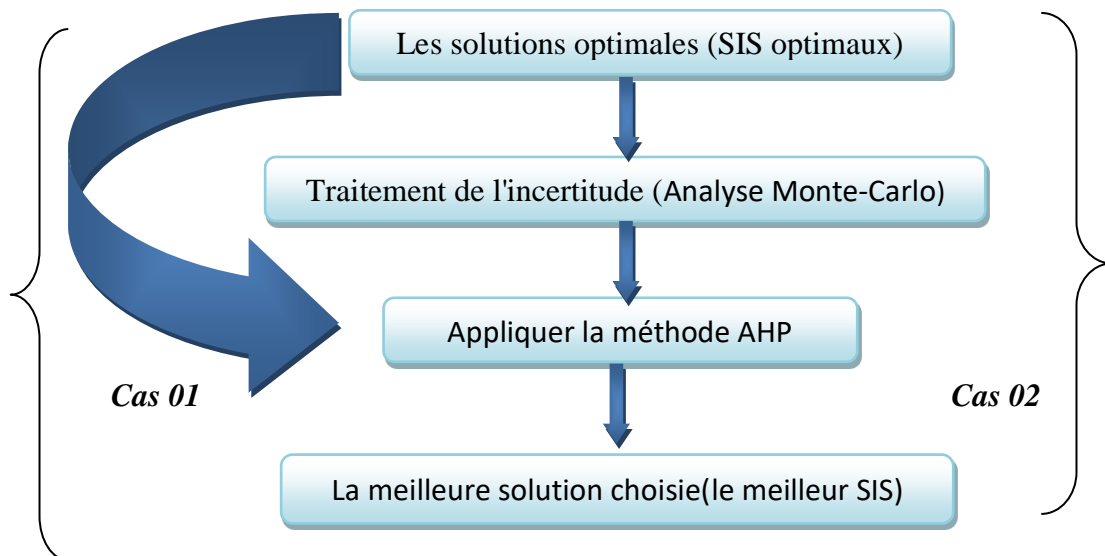


Figure 5.4: La méthodologie proposée

- ✓ Cas 01 : non-prise en compte du traitement de l'incertitude (étape 1,3 et 4).
- ✓ Cas 02 : prise en compte du traitement de l'incertitude (étape 1,2,3,4).

La première étape de la méthodologie proposée, c'est-à-dire l'étape permettant d'arriver aux solutions optimales, est déjà expliquée dans le chapitre précédent. Parmi les solutions proposées, nous choisissons cinq solutions présentées dans le tableau suivant :

Tableau 5.4: Quelques solutions de l'ensemble optimal de Pareto

N	Variables												Objective		
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀	X ₁₁	X ₁₂	PFD_{avg}^{sis}	STR_{avg}^{sis}	Coût (u)
01	5	1	1	1	3	1	1	1	4	2	1	1	1,1508E-4	2,0036E-6	1,1149E+5
02	4	3	1	3	2	2	1	3	2	2	1	1	1,4511E-4	8,3903E-8	6,2565E+4
03	3	2	1	3	1	1	1	3	2	2	1	1	1,3463E-4	9,5539E-8	4,9389E+4
04	4	3	1	3	1	1	1	3	2	2	1	2	2,4645E-4	8,3903E-8	6,1621E+4
05	4	3	2	1	1		1	2	2	2	1	2	3,0074E-4	1,2005E-7	4,5329E+4

La structure hiérarchique de l'étude est construite comme le montre la Figure (5.5). Elle contient l'objectif de décision « le SIS optimal », les alternatives pour l'atteindre (5 SIS), et les critères d'évaluation des alternatives (PFD_{avg}^{sis} , STR_{avg}^{sis} et coût).

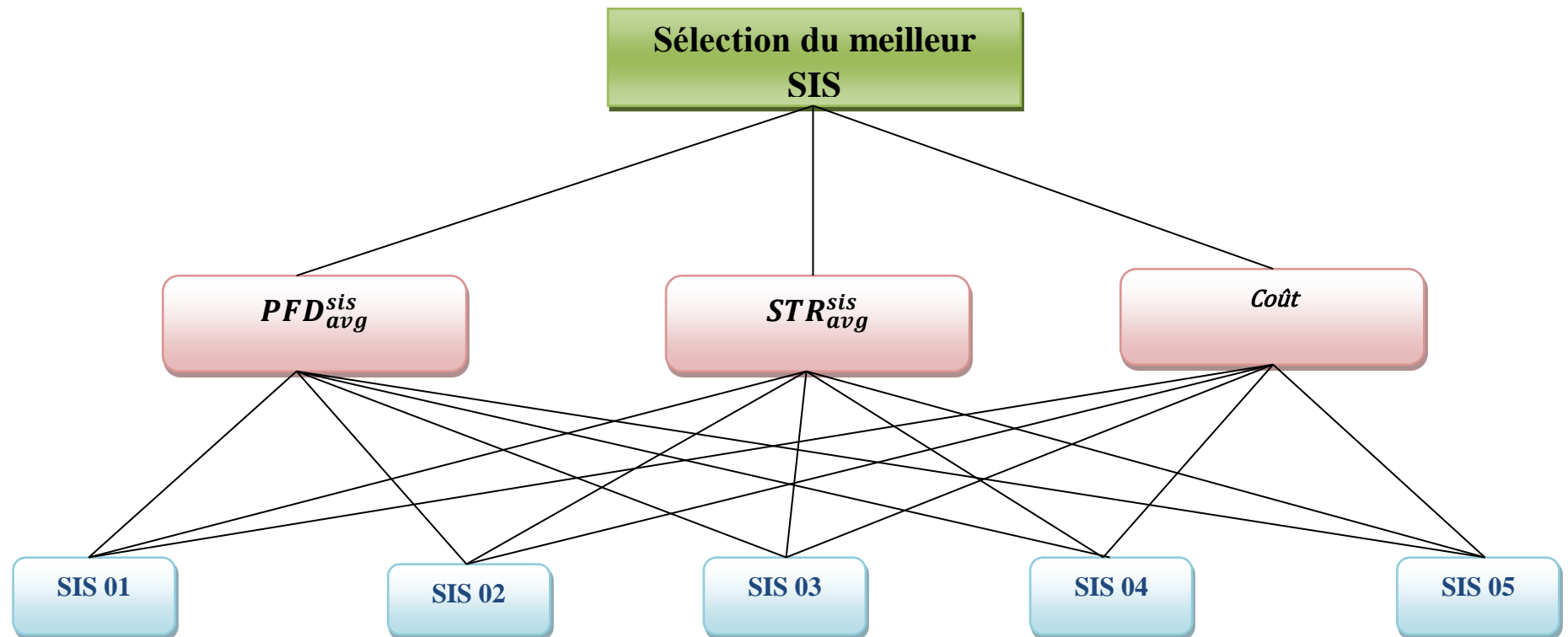


Figure 5.5: Hiérarchie pour la sélection d'une SIS

5.8.1. Cas 01 : non-prise en compte du traitement de l'incertitude

Après avoir complété les étapes mentionnées ci-dessus, qui consistent à choisir les solutions proposées et à créer la structure hiérarchique de l'étude, nous passons aux étapes suivantes.

Le choix des critères et leurs pondérations dépendent de l'avis d'experts, et le recueil de ces avis dépend de dialogues et de questions échangées. L'une des méthodes les plus importantes de recueil d'avis est la méthode Dalph, cette méthode est particulièrement utile dans les domaines où les décisions ont des conséquences importantes ou lorsque les avis d'experts constituent la principale source d'information, Pour plus d'informations sur la méthode, nous vous suggérons de vous référer à [29 , 30].

Dans le cas de cette étude, les critères sont des objectifs d'amélioration et les pondérations sont liées à la volonté de réduire le risque à un niveau tolérable.

La matrice suivante montre l'importance de chaque critère par rapport à l'autre.

	PFD_{avg}^{sis}	STR_{avg}^{sis}	Coût
PFD_{avg}^{sis}	1	3	5
STR_{avg}^{sis}	1/3	1	2
cost	1/5	1/2	1

La figure suivante montre la pondération associée à chaque critère.




COST		0.12202
PFD		0.64833
STR		0.22965

Figure 5.6: Pondération associée à chaque critère par rapport à l'objectif global

Sur la base des résultats présentés dans le tableau (5.4), qui peut être considéré comme une matrice de décision dans laquelle chaque valeur de chaque cellule est appelée ou connue sous le nom de valeur de performance, la valeur 1,1508E-4 est la valeur de performance de la première alternative qui est le SIS 01 par rapport au premier critère qui est la PFD_{avg}^{sis} . Ensuite, nous devons classer les critères en critères non bénéfiques et bénéfiques, les critères non bénéfiques sont les critères dont la valeur la plus faible est souhaitée, tandis que les critères bénéfiques sont les critères dont la valeur la plus élevée est souhaitée, et selon cette règle, nos critères d'étude (PFD_{avg}^{sis} , STR_{avg}^{sis} et coût) peuvent être considérés comme des critères non bénéfiques.

Afin de rendre tous les critères comparables, nous utilisons les équations suivantes :

$$Nonbénéfique = \frac{MinX_{ij}}{X_{ij}} \tag{5.7}$$

$$Bénéfique = \frac{X_{ij}}{MaxX_{ij}} \tag{5.8}$$

X_{ij} : valeur de l'alternative i par rapport au critère j.

En utilisant les équations précédentes, nous obtenons la matrice de décision normalisée présentés dans le tableau suivant :

Tableau 5.5:Matrice de décision normalisée.

		Les critères		
		<i>PFD^{sis}_{avg}</i>	<i>STR^{sis}_{avg}</i>	<i>Coût</i>
Les alternatives	SIS 01	1	0.0419	0.4066
	SIS02	0.7931	1	0.7245
	SIS 03	0.8548	0.878	0.9178
	SIS 04	0.4669	1	0.7356
	SIS 05	0.3827	0.6989	1

Les poids de comparaison deux à deux des alternatives sont collectés pour chaque critère obtenu dans les figures 5.7- 5.9.

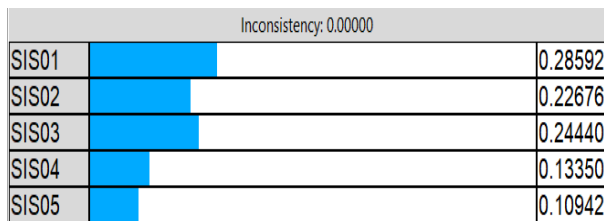


Figure 5.7: Pondérations des alternatives par rapport au critère PFD

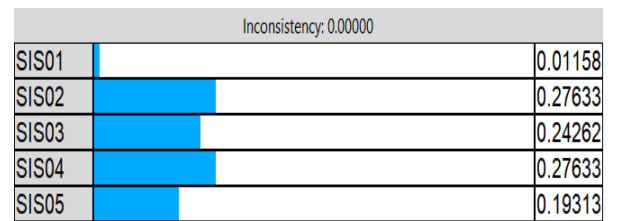


Figure 5.8: Pondérations des alternatives par rapport au critère STR






Inconsistency: 0.00000		
SIS01		0.10744
SIS02		0.19144
SIS03		0.24252
SIS04		0.19437
SIS05		0.26424

Figure 5.9: Pondérations des alternatives par rapport au critère coût

La détermination des priorités globales des systèmes proposés (alternatives) par rapport à l'objectif global nécessite de combiner les poids des alternatives tout en prenant en compte les poids associés aux différents critères. Le classement final des alternatives est présenté dans la figure suivante :

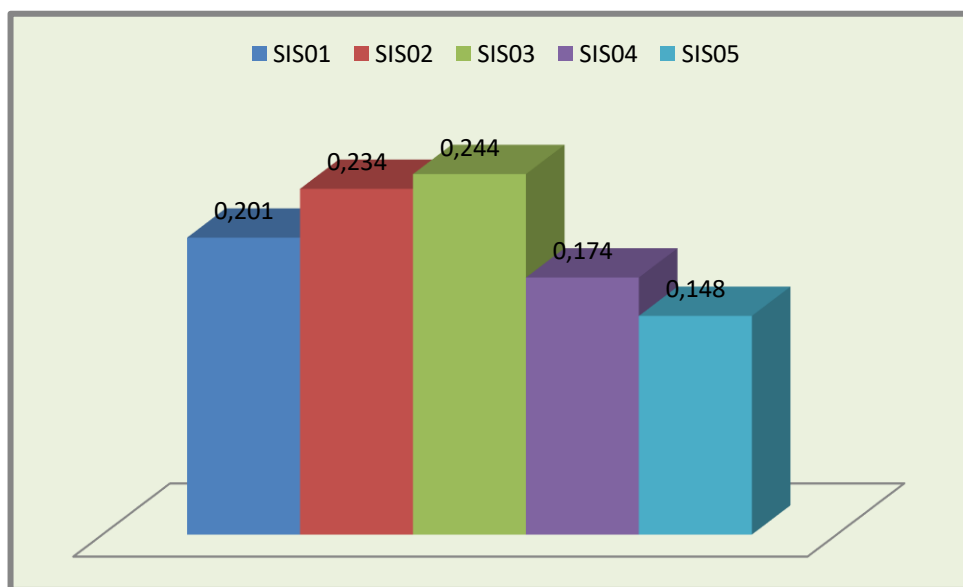


Figure 5.10: Classement général des alternatives

On remarque à partir de cette figure que le SIS 03 représente le premier meilleur avec une pondération globale égale à 0,244.

5.8.2. Cas 02 : prise en compte de l'incertitude

Le tableau suivant présente les caractéristiques de fiabilité et de cycle de vie associée aux SIS n 01, ces caractéristiques sont uniquement données à titre indicatif et sont supposées se situer dans le cadre des données disponibles

Tableau 5.6:Caractéristiques de fiabilité et de cycle de vie des éléments du SIS n01.

Sous-système S:1005	Sous-système LS: 1003	Sous-système FE: 2004
Types des composants: λ 10-6(h) ; MTTR(h); $C_P(u)$; $C_T(u)$; $\beta_{DU}=\beta=\beta_{SU}=2\beta_D=2\beta_{SD}$		
λ_D Train (0,05 ; 0,80 ; 0,15)	λ_D Train (0,006;0,09 ; 0,01)	λ_D Train (0,6 ; 9,02 ; 3,35)
DC Unif (0,25 ; 0,4)	DC Unif (0,72 ; 0,91)	DC Unif (0,15 ; 0,35)
λ_S Train (0,07 ; 0,9 ; 0,383)	λ_S Train (0,006 ; 0,09 ; 0,01)	λ_S Train (0,65 ; 9,02 ; 3,94)
DCs Unif (0,55 ; 0,83)	DCs Unif (0,15 ; 0,3)	DCs Unif (0 ; 0,01)
β Unif (0,01;0,03)	β Unif (0,008;0,02)	β Unif (0,01;0,03)
MTTR _{DD} Logn (log (4);0.246)	MTTR _{DD} Logn (log (4);0.246)	MTTR _{DD} Logn (log (8);0.136)
MTTR _{SD} Logn (log (8);0.136)	MTTR _{SD} Logn (log (4);0.246)	MTTR _{SD} Logn (log (8);0.136)
C_P const (4844)	C_P const (4000)	C_P const (6940)
C_T Unif (48 ;72)	C_T Unif (58 ;82)	C_T Unif (78 ;102)
T1(h)= const (4380)	T1(h)=const t(8760)	T1(h)= const (4380)
Design/install/commissioning PLC=500(u) Trian (400;500;600) Repair PLC =500 (u/event) Unif (400;600) Shut down time =24(h) Unif (19,2;28,8) Maintenance PLC=150 (u/event) Unif(120 ;180) Design overall instrumentation =2000 (u) Unif (1600;2400) Installation/commissioning per instrument =300 (u) Trian (240;300;360) Maintenance per instrument =70 (u/event) Unif(58;84) Repair cost per instrument & PLC = 200 (u/event) Unif(160;240) Cost loss of production =2000 (u/h) Unif (1600;2400) SIS life =15 (years) R=4%Unif (3,7;5) guarantee period=1year for each component		

Les itérations ont été effectuées 1E+04 fois et les résultats obtenus liés à SIS 01 sont résumés dans le tableau (5.7). La figure (5.11) montre comment chacun des trois paramètres (PFD, STR et Coût) change en raison du traitement de l'incertitude. La figure (5.12) montre les *ecdfs* pour les trois critères (*Notez que l'ecdfs est une fonction échelonnée qui augmente de 1/n à chacune des n valeurs de sortie : $F(x) = p(X \leq x) = (\text{nombre d'éléments dans l'échantillon de valeurs de sortie} \leq x) / n$*).

Dans le tableau (5.7), les 5^{ème} et 95^{ème} valeurs (intervalle de confiance) sont calculées directement à partir de l'ecdf :

$$\begin{cases} p(X \leq X_{5\%}) = 0.05 \\ p(X \leq X_{95\%}) = 0.95 \end{cases} \quad (5.09)$$

Tableau 5.7: Résultats obtenus grâce à l'approche MC (SIS 01).

		PFD			STR			Coût			
		Min	Max	Moyen	Min	Max	Moyen	Min	Max	Moyen	
S I S n o 1	S	8,4167E-7	3,6549E-5	9,9554E-6	3,7645E-7	4,4049E-6	2,2405E-6	3,4425E+4	3,9686E+4	3,6918E+4	
	UL	2,7815E-8	1,9860E-6	3,9791E-7	1,8043E-8	2,6598E-7	1,0605E-7	1,9681E+4	2,3460E+4	2,1476E+4	
	FE	1,2049E-5	4,7366E-4	1,4369E-4	7,0099E-9	2,5917E-7	9,0586E-8	3,8833E+4	4,3693E+4	4,1108E+4	
	SIS		2,0998E-5	4,9961E-4	1,5405E-4	4,8491E-7	4,6494E-6	2,4372E-6	1,0104E+5	1,3245E+5	1,1270E+5
			PFD _{0.05} =6.5163E-05 PFD _{0.95} =2.9963E-04			STR _{0.05} =1.0990E-06 STR _{0.95} =3,9197E-06			Coût _{0.05} =1.0563E+05 Coût _{0.95} =1.2092E+05		

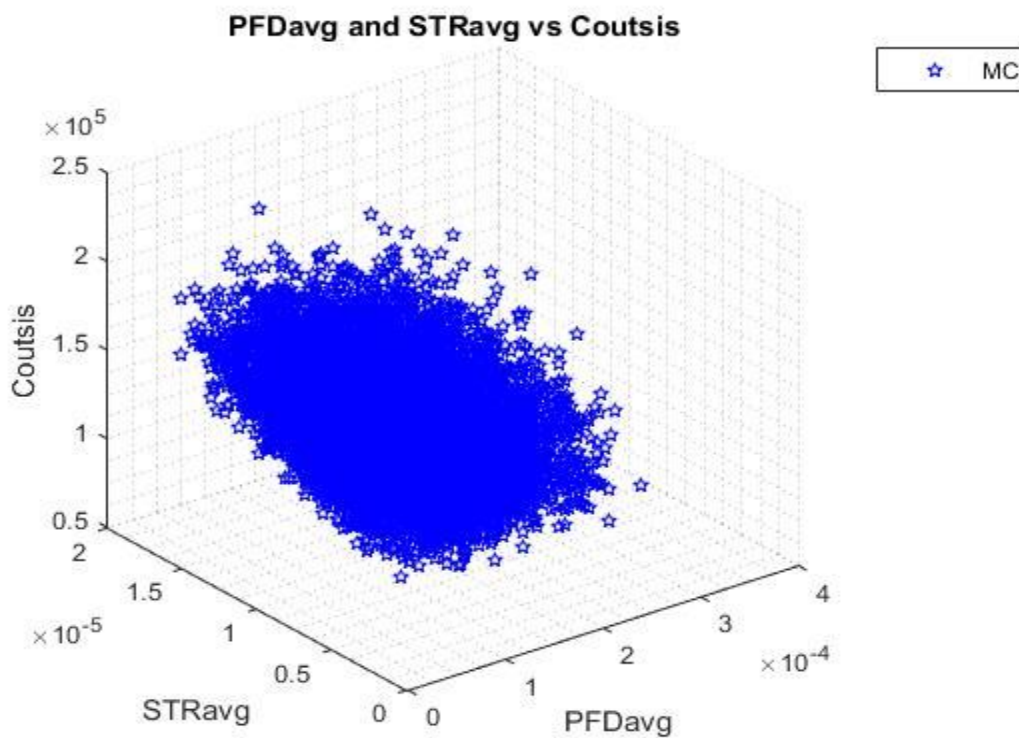


Figure 5.11: Changement des trois paramètres (PFD, STR et Coût) associés au SIS 01.

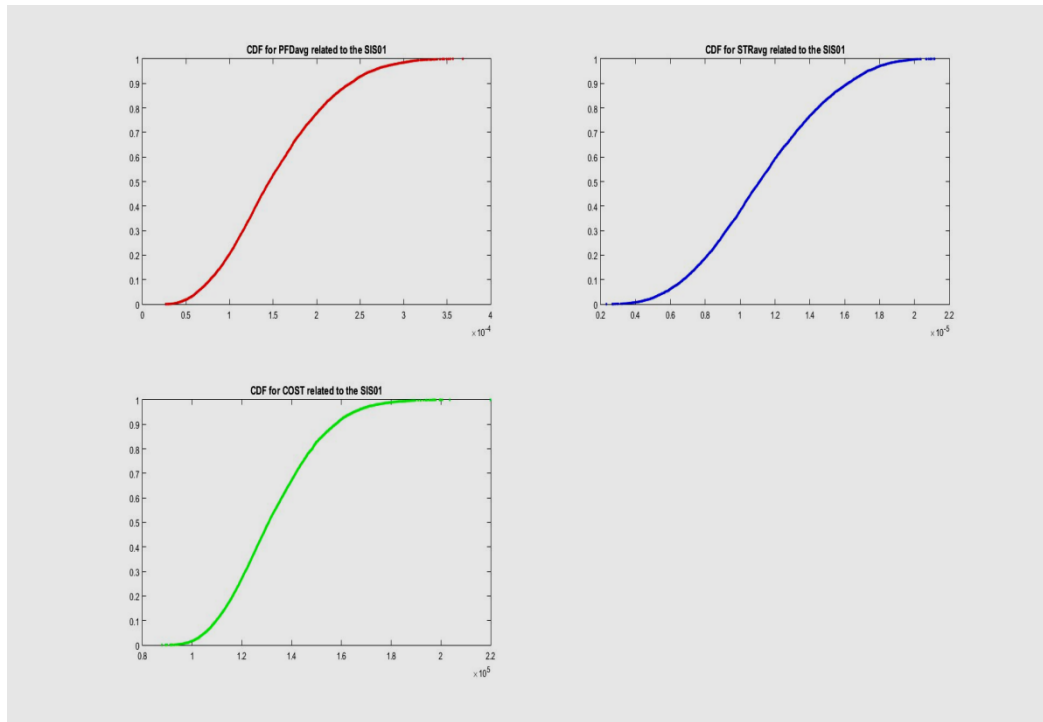


Figure 5.12: Fonction de distribution cumulative empirique pour les trois critères (PFD, STR et Coût).

De la même manière nous considérons l'incertitude associée au SIS restant pour obtenir le tableau suivant :

Tableau 5.8:Résultats obtenus grâce à l'approche MC liée aux sis proposé

		PFD			STR			Coût		
		Min	Max	moyen	Min	Max	moyen	Min	Max	moyen
SIS	0	2,0998E-5	4,9961E-4	1,5405E-4	4,8491E-7	4,6494E-6	2,4372E-6	1,0104E+5	1,3245E+5	1,1270E+5
	1	PFD _{0.05} =6.5163E-05 PFD _{0.95} =2.9963E-04			STR _{0.05} =1.0990E-06 STR _{0.95} =3,9197E-06			Coût _{0.05} =1.0563E+05 Coût _{0.95} =1.2092E+05		
	2	6,3129E-5	7,9488E-4	3,0725E-4	1,3862E-8	2,5903E-7	9,6554E-8	5,9079E+4	6,5441E+4	6,242E+4
	3	PFD _{0.05} =1.5161E-04 PFD _{0.95} =5.0810E-04			STR _{0.05} =3.7098E-08 STR _{0.95} =1.8265E-07			Coût _{0.05} =6.1025E+04 Coût _{0.95} =6.3862E+04		
	4	5,7375E-5	5,5655E-4	2,4083E-4	3,0441E-8	2,9282E-7	1,3449E-7	4,7079E+4	5,1914E+4	4,9450E+4
	5	PFD _{0.05} =1.2668E-04 PFD _{0.95} =3.7610E-04			STR _{0.05} =7.1340E-08 STR _{0.95} =2.0660E-07			Coût _{0.05} =4.8311E+04 Coût _{0.95} =5.0603E+04		
	6	6,9524E-5	1,1E-3	3,9231E-4	2,4295E-8	3,2396E-7	1,3168E-7	5,1337E+4	5,6455E+4	5,3987E+4
	7	PFD _{0.05} =1.7874E-04 PFD _{0.95} =6.8676E-04			STR _{0.05} =6.2074E-08 STR _{0.95} =2.2063E-07			Coût _{0.05} =5.2861E+04 Coût _{0.95} =5.5170E+04		
	8	8,4607E-5	1,5E-3	4,5936E-4	4,2290E-8	4,4249E-7	1,8490E-7	4,2727E+4	4,9337E+4	4,5664E+4
	9	PFD _{0.05} =2.2817E-04 PFD _{0.95} =8.4659E-04			STR _{0.05} =1.0032E-07 STR _{0.95} =2.8938E-07			Coût _{0.05} =4.4192E+04 Coût _{0.95} =4.7189E+04		

A) - En utilisant les valeurs moyennes des critères liées aux cinq sis présentés dans le tableau (5.8) pour déduire la matrice de décision normalisée suivante présentée dans le tableau (5.9) de la même manière que celle utilisée pour déduire la matrice présentée dans le tableau (5.5), en s'appuyant sur les équations (5.7 et 5.8).

Tableau 5.9:Matrice de décision normalisée selon les valeurs moyennes

		Les critères		
		PFD_{avg}^{sis}	STR_{avg}^{sis}	Coût
Les alternatives	SIS 01	1	0.0396	0.4052
	SIS 02	0.5012	1	0.7316
	SIS 03	0.6396	0.7179	0.9234
	SIS 04	0.3926	0.7332	0.8458
	SIS 05	0.3353	0.5222	1

Les poids de comparaison deux à deux des alternatives sont collectés pour chaque critère obtenu dans les figures 5.13- 5.15.

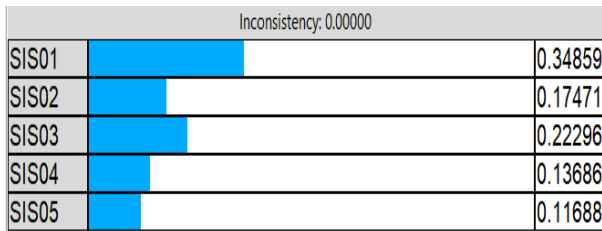


Figure 5.13:Les pondérations des alternatives par rapport au critère PFD (valeur moyenne)

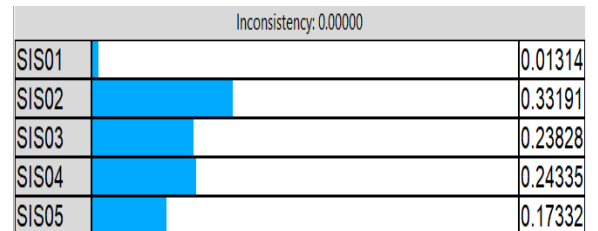


Figure 5.14: Les pondérations des alternatives par rapport au critère STR (valeur moyenne)

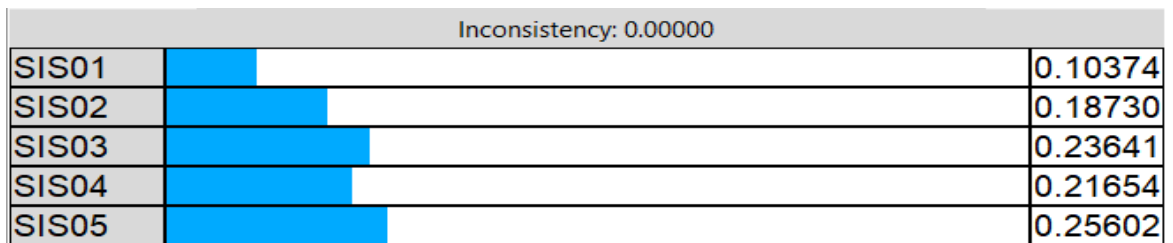


Figure 5.15: Les pondérations des alternatives par rapport au critère coût (valeur moyenne)

Le classement final des alternatives est présenté dans la figure suivante :

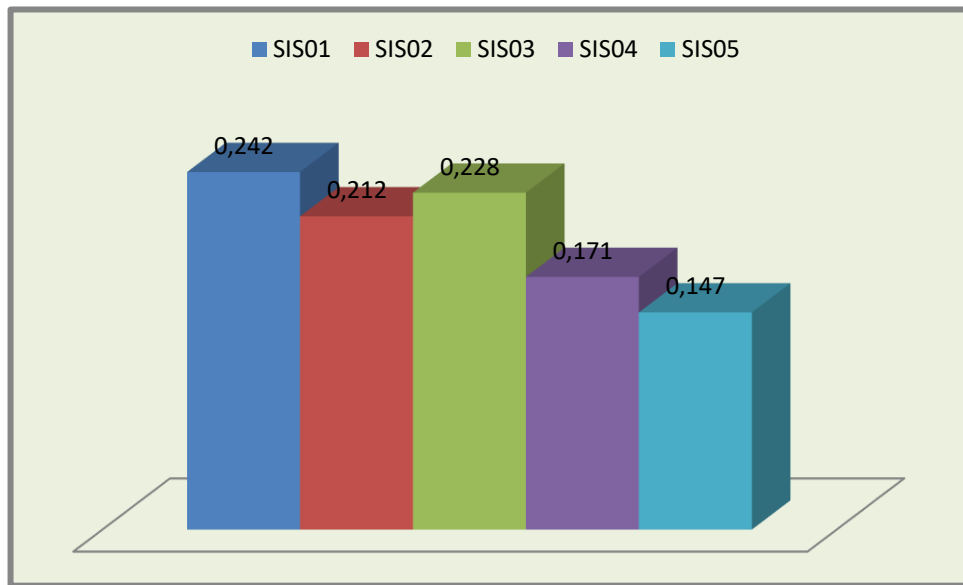


Figure 5.16: Classement général des alternatives selon les valeurs moyennes

On remarque à partir de la figure précédente que le SIS 01 représente la meilleure solution avec une pondération globale égale à 0,242.

B) - Avec les mêmes étapes, nous appliquerons la méthode en prenant les valeurs max de l'intervalle de confiance pour chaque critère ($X_{0.95}$; X : PFD, STR., Coût) propre à chaque système présenté dans le tableau (5.8). Au final, nous obtenons la figure suivante, qui montre le classement général des alternatives.

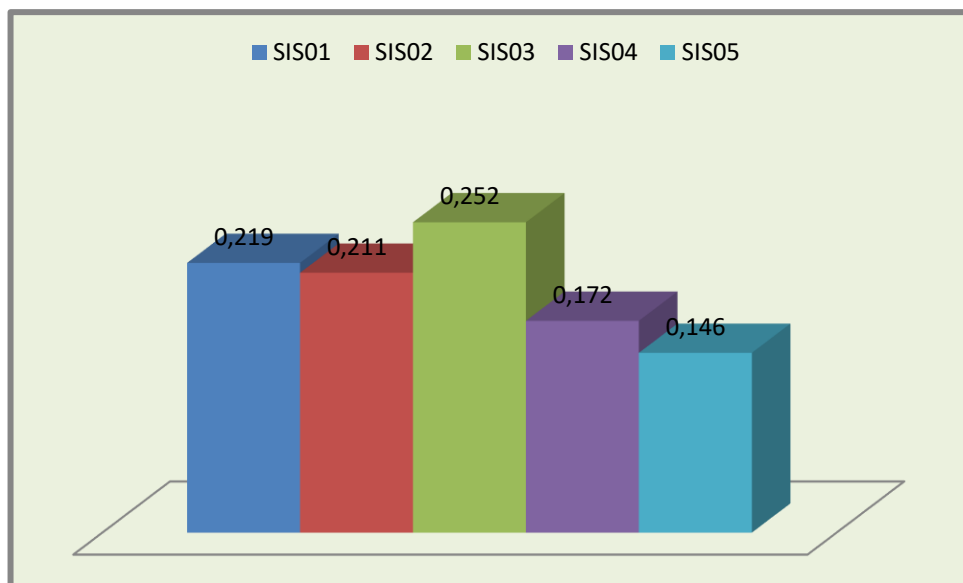


Figure 5.17: Classement général des alternatives selon les valeurs $X_{0.95}$.

Dans ce cas on remarque que le SIS 03 représente la meilleure solution avec une pondération globale égale à 0,252.

5.9. La sélection dans le cadre d'une analyse coûts-bénéfices et l'AHP

Nous considérons la présence d'une installation dans une usine spécifique, et cette installation peut générer de nombreux scénarios d'accidents (qui peuvent être identifiés l'aide de la méthode HAZOP). Le scénario que nous voulons aborder est une explosion, par exemple. Quatre mesures de sécurité ont été suggérées pour ce traitement. Pour choisir entre ces mesures, nous nous appuyerons sur l'AHP, en raison des préférences et opinions des décideurs, qui peuvent ne pas accorder la même importance aux types de coûts. Par exemple, le décideur peut voir que le coût d'achat est plus important pour lui par rapport au coût d'entretien. De même, en ce qui concerne les bénéfices, on peut constater que les bénéfices humains sont bien plus importants que les autres bénéfices.

Comme nous l'avons déjà dit, le choix des critères et leurs pondérations dépendent de l'avis d'experts, et le recueil de ces avis dépend de dialogues et de questions échangées.

La structure hiérarchique de l'étude est construite comme le montre la Figure (5.18). Elle contient l'objectif de décision «la mesure de sécurité optimale », les alternatives pour l'atteindre (04 mesure de sécurité), et les critères d'évaluation des alternatives (les coûts et les bénéfices), et ces critères sont divisés en sous-critère suivantes :

- ❖ Les coûts (coût d'achat (CA) ; coût d'installation (CI) ; coût d'exploitation 'coût de maintenance + coût de teste +coût d'énergie' (CE) ; coût des déclenchements intempestifs (Cdi)).
- ❖ Les bénéfices (impacts positifs sur le personnel (B_{Per}), l'environnement (B_{Env}), le public (B_{Pub}) et le matériel et la production (B_{mat}))

RQ : Ces critères peuvent varier d'un cas à l'autre et d'une usine à l'autre, et cela dépend du lieu d'étude, du chercheur, des décideurs et des faiseurs d'opinion. Autrement dit, cette étude est une étude explicative qui peut être adaptée selon le cas étudié.

La première comparaison par paires a été réalisée entre des critères affectant le niveau le plus élevé de la hiérarchie (pour réaliser le principe ALARP, nous nous appuyerons sur Le facteur de disproportion (DF) pour une comparaison par paire). Cependant, si l'analyse coûts- bénéfices est appliquée en dehors du cadre du principe ALARP, la comparaison entre les coûts et les bénéfices peut être égale.

	Les coûts	Les bénéfices
Les coûts	1	1/DF
Les bénéfices	DF	1

Dans notre cas, nous pouvons simplement résoudre l'équation :

$$Y = DF * \text{Bénéfices} - \text{coûts}. \tag{5.10}$$

Autrement dit, on peut abandonner la matrice de comparaison entre les critères et conserver les matrices de comparaison entre les sous-critères présentées à l'étape suivante.

Dans cette étape nous comparons les différents sous-critères entre eux ((CA ; CI ; CE ; Cdi), (B_{Pe} ; B_{Env} ; B_{Pub} ; B_{mat})) pour identifier leur importance par rapport à l'objectif de l'étude, comme le montre les matrices suivantes.

	B _{Pe}	B _{Env}	B _{Pub}	B _{mat}
B _{Pe}	1	4	3	3
B _{Env}	1/4	1	1/3	2
B _{Pub}	1/3	3	1	3
B _{mat}	1/3	1/2	1/3	1

	CA	CI	CE	Cdi
CA	1	4	5	2
CI	1/4	1	1/2	1/3
CE	1/5	2	1	1/4
Cdi	1/2	3	4	1

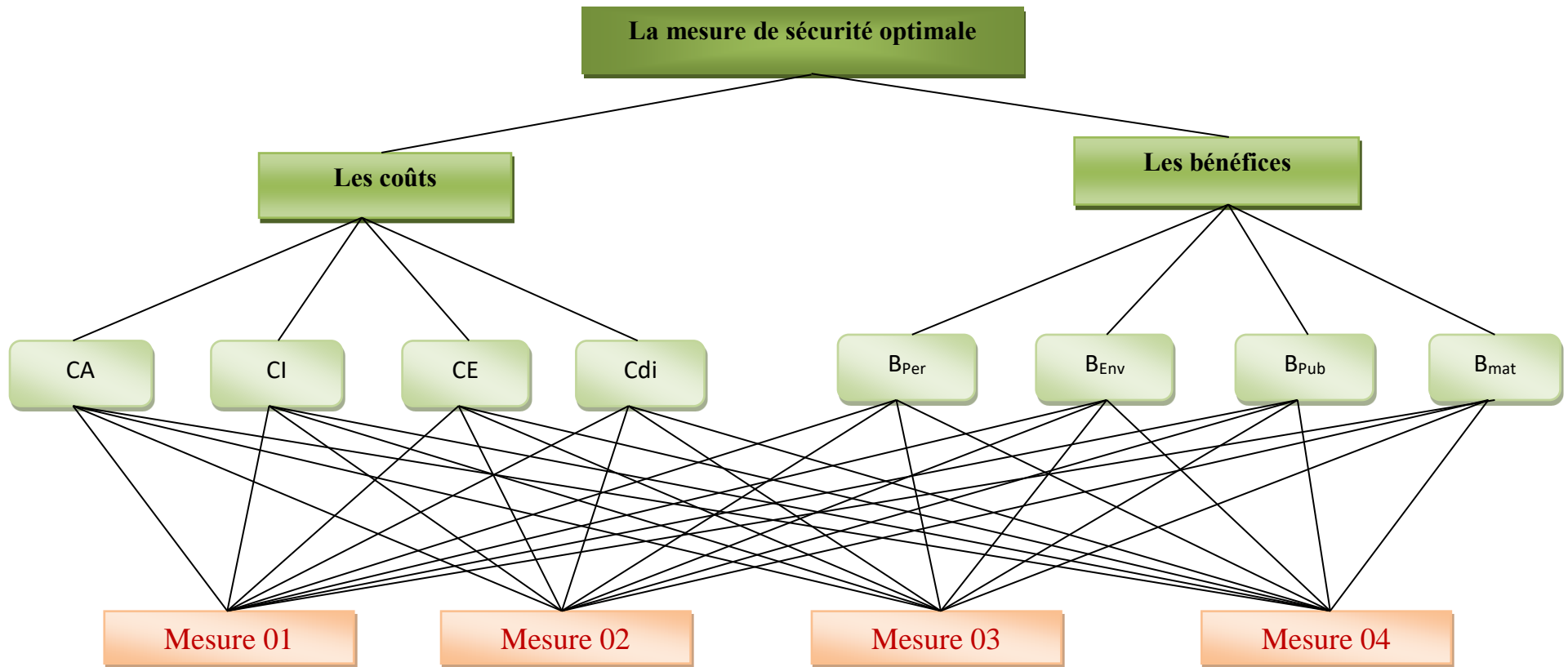


Figure 5.18: Hiérarchie pour la sélection d'une mesure de sécurité.

Les coûts et bénéfices de chaque mesure de sécurité proposée sont présentés dans les deux tableaux suivants basés sur les données monétaires et QRA.

Tableau 5.10: Coûts liés aux mesures de sécurité

	CA	CI	CE	Cdi
Mesure 01	1500	300	555	400
Mesure 02	1200	250	300	450
Mesure 03	2500	450	350	350
Mesure 04	3000	200	450	250

Tableau 5.11: Bénéfices liés aux mesures de sécurité

	B _{Pe}	B _{Env}	B _{Pub}	B _{mat}
Mesure 01	350	150	200	200
Mesure 02	400	250	250	150
Mesure 03	550	300	300	250
Mesure 04	600	150	300	270

Remarque très importante :

Dans le cas où il existe une différence dans l'évaluation des alternatives par rapport aux critères ou aux sous-critères (ou les deux à la fois), dans l'unité de mesure par exemple (temps versus qualité ou prix...) on doit utiliser les formules (5.7) et (5.8).

Dans notre exemple représenté sur la figure 5.18, le critère 'efficacité contre les dangers identifiés' peut être ajouté en plus des critères de coûts et de bénéfices, et comme nous l'avons dit précédemment, le choix des critères varie en fonction de l'étude.

Les figures 5.19) et (5.20) montrent la comparaison par paires entre les sous-critères. Les différents effets de (CA ; CI ; CE ; Cdi) et (B_{Pe} ; B_{Env} ; B_{Pub} ; B_{mat}) ont été comparés entre eux pour identifier leur importance par rapport à l'objectif de l'étude.

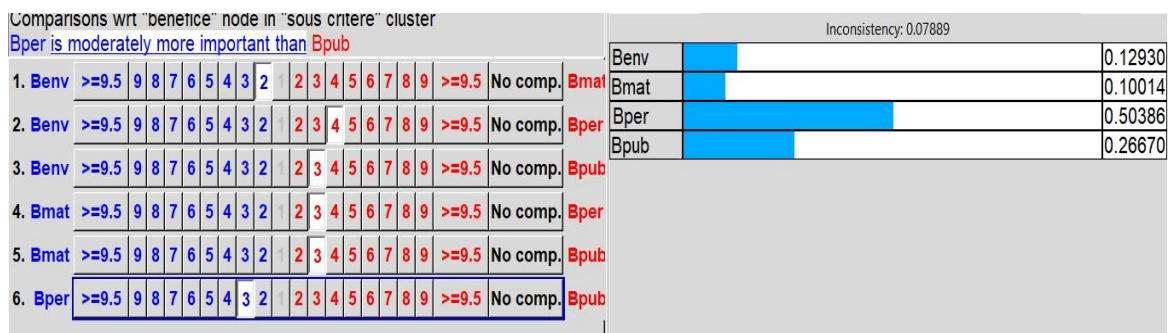


Figure 5.19: Comparaisons des sous critères (bénéfices) par paires par rapport à l'objectif global et aux pondérations associées.

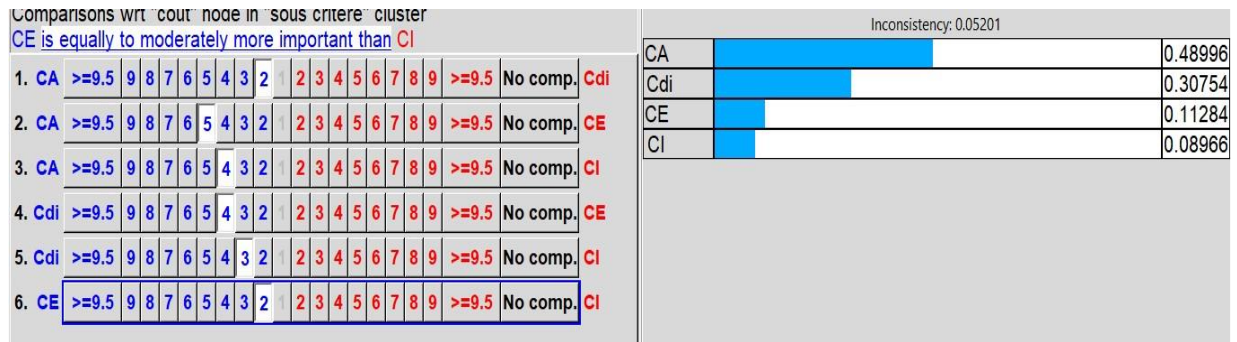


Figure 5.20: Comparaisons des sous critères (coûts) par paires par rapport à l'objectif global et aux pondérations associées.

Pour déterminer la mesure de sécurité (alternative) appropriée par rapport à l'objectif global, on remplace les valeurs des coûts et des bénéfices et aussi les poids de chaque sous critères dans l'équation suivante :

$$Y = DF. [(\sum_{vi} P_i \cdot B_i) - (\sum_{vj} P_j \cdot C_j)] \tag{5.11}$$

Avec :

i : sous-bénéfices. P_i : la pondération liée au sous-bénéfices i. B_i : la valeur de sous- bénéfices i.
 j : sous- coûts. P_j : la pondération liée au sous- coûts j. B_j : la valeur de sous- coûts j.

Cette équation représente le résultat de l'intégration de l'ACB et la AHP

Le remplacement des valeurs et des poids mentionnés précédemment dans l'équation (5.11) est représenté par l'équation (5.12). D'après les résultats de cette équation, nous remarquons que la mesure de sécurité n°3 (M03) est la meilleure par rapport à l'objectif global, Comme le montre la figure suivante :

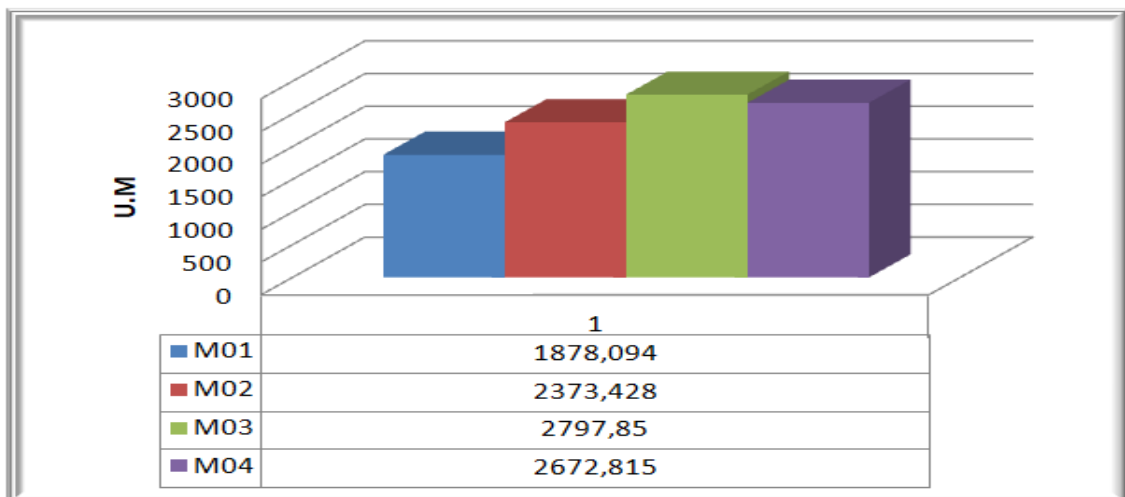


Figure 5.21: Histogramme représentant les résultats de l'équation 5.12.

$$\begin{pmatrix} M_1 \\ M_2 \\ M_3 \\ M_4 \end{pmatrix} = 10 \left(0,50386 \begin{pmatrix} 350 \\ 400 \\ 550 \\ 600 \end{pmatrix} + 0,2667 \begin{pmatrix} 250 \\ 250 \\ 300 \\ 300 \end{pmatrix} + 0,1293 \begin{pmatrix} 150 \\ 250 \\ 300 \\ 150 \end{pmatrix} + 0,1004 \begin{pmatrix} 200 \\ 150 \\ 250 \\ 270 \end{pmatrix} \right) - \left(0,48996 \begin{pmatrix} 1500 \\ 1200 \\ 2500 \\ 3000 \end{pmatrix} + 0,30754 \begin{pmatrix} 400 \\ 450 \\ 350 \\ 250 \end{pmatrix} + 0,11284 \begin{pmatrix} 550 \\ 300 \\ 350 \\ 450 \end{pmatrix} \right)$$

$$\begin{pmatrix} 550 \\ 300 \\ 350 \\ 450 \end{pmatrix} + 0,08966 \begin{pmatrix} 300 \\ 250 \\ 450 \\ 200 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1878,094 \text{ (U.M)} \\ 2373,428 \text{ (U.M)} \\ 2797,85 \text{ (U.M)} \\ 2672,815 \text{ (U.M)} \end{pmatrix} \quad (5.12)$$

5.10. Conclusion :

Ce chapitre se compose de deux idées principales : la première idée est de choisir le SIS approprié en utilisant la méthode AHP, tout en abordant les incertitudes liées au processus d'optimisation en utilisant la méthode de Monte Carlo.

Quant à la deuxième idée, elle consiste à choisir la barrière de sécurité appropriée dans le cadre de l'application de l'analyse coût-bénéfice en utilisant la méthode AHP. Dans cette idée, les bénéfices et les coûts ont été divisés en catégories et à chaque catégorie s'est attribuer un poids, afin de déterminer le système qui présente le plus grand poids bénéficiaire.

Références du chapitre 05 :

- [1] Forman, E. H., & Gass, S. I. (2001). The analytic hierarchy process—an exposition. *Operations research*, 49(4), 469-486.
- [2] Contreras-Salinas, J., Lopez-Irarragorri, F., DeLaHoz-Granadillo, E., & Barrera-Cortinas, F. (2022). Multicriteria Methodology Based on Hierarchical Process Analysis (AHP) for the Selection and Evaluation of Companies in an Entrepreneurial Project Accelerator.
- [3] Zeli, C. (2022, September). The Establishment and Research of an Evaluation Model Based on Network Analytic Hierarchy Process. In *Proceedings of the 7th International Conference on Intelligent Information Processing* (pp. 1-7).
- [4] Cui, H., Zhang, H., Zhou, L., Yang, C., Li, B., & Zhao, X. (2023). Fuzzy analytic hierarchy process with ordered pair of normalized real numbers. *Soft Computing*, 1-22.
- [5] Madzík, P., & Falát, L. (2022). State-of-the-art on analytic hierarchy process in the last 40 years: Literature review based on Latent Dirichlet Allocation topic modelling. *Plos One*, 17(5), e0268777.
- [6] Salunkhe, S., Nandgude, S., & Bhange, H. (2022). Land suitability analysis for Mango using AHP method.
- [7] Dos Santos, M., de Araújo Costa, I. P., & Gomes, C. F. S. (2021). Multicriteria decision-making in the selection of warships: a new approach to the AHP method. *International Journal of the Analytic Hierarchy Process*, 13(1).
- [8] Oliver, L. (2023, October 18). The AHP method: Definition and example. Indeed. tiré de <https://www.indeed.com/career-advice/career-development/ahp-method>.
- [9] Velmurugan, R., Selvamuthukumar, S., & Manavalan, R. (2011). Multi criteria decision making to select the suitable method for the preparation of nanoparticles using an analytical hierarchy process. *Die Pharmazie-An International Journal of Pharmaceutical Sciences*, 66(11), 836-842.
- [10] Cheng, S. C., Chen, M. Y., Chang, H. Y., & Chou, T. C. (2007). Semantic-based facial expression recognition using analytical hierarchy process. *Expert Systems with Applications*, 33(1), 86-95.
- [11] Saaty, T. L. (1980). *The analytic hierarchy process: planning, priority setting, resource allocation*.
- [12] Brunelli, M. (2015). *Introduction to the Analytic Hierarchy Process*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-12502-2>.

- [13] Saaty, T. L., & Hu, G. (1998). Ranking by eigenvector versus other methods in the analytic hierarchy process. *Applied Mathematics Letters*, 11(4), 121-125.
- [14] Matthews, R. A. (2020). The origins of the treatment of uncertainty in clinical medicine. Part 1: ancient roots, familiar disputes. *Journal of the Royal Society of Medicine*, 113(5), 193-196.
- [15] Köhn, J., & Köhn, J. (2017). The Origin of Profit. *Uncertainty in Economics: A New Approach*, 97-107.
- [16] Suleiman, M., Ahmad. (2015). John Ford's Perkin Warbeck: The Origin of the Uncertainty. *An International Journal of Humanities and Social Sciences*, ISSN: 2349-2147.
- [17] INCERTITUDE | English meaning—Cambridge Dictionary. (s. d.). Consulté 24 Aout 2023, à l'adresse <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/incertitude/42222>.
- [18] Efraín, M. S. C. (2023). From uncertainty to the faith' qualitative leap. *World Journal of Advanced Research and Reviews*, 18(1), 1224-1228. DOI: <https://doi.org/10.30574/wjarr.2023.18.1.0398>.
- [19] Innal, F., Mourad, C., Bourareche, M., & Mohamed, A. S. (2013, October). Treatment of uncertainty in probabilistic risk assessment using Monte Carlo analysis. In *3rd International Conference on Systems and Control* (pp. 763-768). IEEE.
- [20] Zhang, L., Lai, Z., Yang, H., Liu, Y., Hu, N., & Yang, Q. (2022, December). Uncertainty Analysis Technology of Complex System Based on Evidence Theory. In *2022 4th International Conference on System Reliability and Safety Engineering (SRSE)* (pp. 35-40). IEEE.
- [21] Saltelli, A., & Chan, K. (2000). *Scott EM: sensitivity analysis*. Wiley, 79, 80.
- [22] SUN, X. (2023). Sensitivity analysis: Advancing the effectiveness of global sensitivity analysis. *Bulletin of the Australian Mathematical Society*, 107(2), 351-352.
- [23] IEC 61508 (2010), *Functional Safety of Electrical/electronic/programmable Electronic Safety Related Systems*, 2nd ed., IEC 61508 Standard, Geneva.
- [24] Innal, F., Chebila, M., & Dutuit, Y. (2016). Uncertainty handling in safety instrumented systems according to IEC 61508 and new proposal based on coupling Monte Carlo analysis and fuzzy sets. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 44, 503-514.

- [25] Ross, J., & Marshak, A. (1991). Monte Carlo methods. In *Photon-vegetation Interactions: Applications in optical remote sensing and plant ecology* (pp. 441-467). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- [26] NASA, Probabilistic Risk Assessment Procedures Guide for NASA Managers and Practitioners. NASA Office of Safety and Mission Assurance, Washington, 2002.
- [27] Epa, U. (2009). Guidance on the development, evaluation, and application of environmental models. Environmental Protection Agency. EPA/100/K-09/003.
- [28] Saltelli, A. (2006). The critique of modelling and sensitivity analysis in the scientific discourse. An overview of good practices Transatlantic Uncertainty Colloquium (TAUC) Washington, October 10-11.
- [29] Sablatzky, T. (2022). The Delphi method. *Hypothesis: Research Journal for Health Information Professionals*, 34(1).
- [30] Humphrey-Murto, S., Wood, T. J., Gonsalves, C., Mascioli, K., & Varpio, L. (2020). The delphi method. *Academic Medicine*, 95(1), 168.

Conclusion Générale

Conclusion Générale :

Les institutions et les entreprises visent à réduire les risques à un niveau tolérable et maintenable dans le temps. Cette réduction est obtenue par la prise de décisions concernant l'intervention successive de plusieurs barrières de sécurité entre la source du risque et les cibles potentielles, en s'appuyant sur des outils d'aide à la décision. Ce travail doctoral s'inscrit dans la problématique de la prise de décisions en matière d'investissements de sécurité à l'aide de l'analyse coûts-avantages, considérée comme un outil efficace pour comparer les coûts et les bénéfices d'une décision spécifique. Pour mieux appréhender cette méthode et son rôle dans la gestion des risques industriels, nous avons réalisé les étapes suivantes :

Nous avons d'abord, au premier chapitre, clarifié les termes et concepts essentiels liés à ce sujet, en mettant l'accent sur le concept d'optimisation et ses principales méthodes, le considérant comme le cœur du processus de prise de décision.

Dans le deuxième chapitre, nous avons expliqué l'utilisation des concepts fondamentaux de la théorie économique pour évaluer les investissements en sécurité. L'Analyse Coût-Bénéfice (CBA) peut être utilisée par les décideurs pour évaluer ces investissements et rendre la phase d'évaluation plus transparente, tout en fournissant un aperçu plus large des perspectives d'investissement. La CBA est largement utilisée dans la prise de décision en matière de santé et de sécurité pour illustrer le concept de réduction des risques au niveau le plus bas raisonnablement possible (ALARP). Il s'agit donc de clarifier le cadre d'application de la méthodologie d'analyse coût-bénéfice.

Dans le troisième chapitre, nous avons mis l'accent sur cinq sections principales où différentes variables ont été identifiées et intégrées pour calculer à la fois les coûts des mesures de sécurité et les avantages qui en découlent. Un modèle général des coûts et bénéfices liés aux barrières de sécurité a été présenté. À la fin de ce chapitre, le concept de répartition optimale du budget de sécurité pour obtenir le plus grand bénéfice possible a été expliqué à l'aide d'un exemple simple.

Dans le quatrième chapitre, deux approches importantes ont été présentées pour la conception des systèmes de contrôle automatique, qui sont aujourd'hui considérés comme l'une des barrières de sécurité les plus importantes. La première repose sur l'analyse coût-efficacité, tandis que la seconde repose sur l'analyse coût-bénéfice.

Pour la première approche, appelée l'analyse coût-efficacité de la conception du système instrumenté de sécurité (SIS), l'objectif est de résoudre un problème multi-objectif

Conclusion générale

visant à minimiser trois aspects : la probabilité ou fréquence de défaillance, le taux de déclenchement intempestif et le coût du cycle de vie. Cette méthode est illustrée par un exemple général nécessitant l'utilisation de SIS avec SIL3, en se basant sur l'analyse des architectures KooN pour divers composants et l'évolution des stratégies de test. Ce problème a été résolu à l'aide de deux méthodes méta-heuristiques : les algorithmes génétiques multi-objectifs, largement utilisés pour ce type de problème, et le Multi-objective Manta Ray Foraging Optimizer, une méthode moderne qui a donné des résultats prometteurs pour la résolution de problèmes réels avec plusieurs objectifs. Cela démontre la flexibilité et la facilité d'application de ce nouvel algorithme, ainsi que sa supériorité sur les algorithmes génétiques en termes de nombre de solutions obtenues, offrant ainsi davantage d'options au décideur.

Concernant la deuxième approche, intitulée « la conception des systèmes instrumentés de sécurité dans le cadre de l'analyse coût-bénéfice », l'objectif est de clarifier l'application de cette analyse dans la gestion des risques et la prise de décision quant au choix des barrières de sécurité, représentées ici par les systèmes instrumentés de sécurité (SIS). Pour résoudre ce problème, nous avons également utilisé l'algorithme Multi-objective Manta Ray Foraging Optimizer.

Les solutions résultantes de l'optimisation sont considérées comme optimales et, pour choisir entre elles, nous avons utilisé la méthode AHP, comme démontré dans le dernier chapitre. Nous avons sélectionné cinq solutions parmi celles présentées dans le chapitre précédent, et en nous basant sur l'AHP, nous avons attribué un poids à chaque objectif étudié (PFD, STR, Coût) afin de choisir le meilleur système instrumenté de sécurité (SIS) pour l'objectif de l'étude, en tenant compte de l'incertitude liée au processus d'optimisation via la méthode de Monte Carlo. À la fin de ce chapitre, nous avons expliqué l'idée de choisir la barrière de sécurité appropriée dans le cadre de l'application de l'analyse coûts-bénéfices selon la méthode AHP. Dans cette approche, les avantages et les coûts ont été divisés en catégories, et une pondération a été attribuée à chaque catégorie, afin de déterminer le système offrant la pondération la plus bénéfique.

Pour les travaux futurs, des améliorations pourraient porter sur l'évolution des modèles proposés en termes de coûts et de bénéfices, aboutissant ainsi à un nouveau cadre et à une formulation révisée du problème d'optimisation des performances des systèmes instrumentés de sécurité (SIS). De plus, il pourrait être intéressant d'explorer l'idée de la prise de décision robuste pour des conceptions plus efficaces des SIS.