

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université 20 Août 1955 Skikda  
Faculté : science et technologie  
Département : Génie des procédés  
Réf : D012125021D

جامعة سكيكدة 20 اوت 1955  
كلية : تكنولوجيا  
قسم : هندسة الطرائق  
المرجع: D012125021D



Thèse présentée en vue de l'obtention Du diplôme de

**Doctorat LMD en**

**Filière : Hygiène et Sécurité Industrielle**

**Spécialité : Automatisation et contrôle en industries pétrochimiques**

**Titre :**

**Contribution à la gestion des risques par prévision et prévention dans le transport des marchandises dangereuses**

Présentée par :

**ACHOURI MOURAD**

*Soutenue Le 24/05/ 2025*

Devant le jury

*Président :	M <sup>d</sup> Rouainia Mounira	Pr	Université 20 Août 1955 Skikda
*Directeur de thèse :	M <sup>f</sup> Youcef Zennir	Pr	Université 20 Août 1955 Skikda
*Co-encadrant :	M <sup>f</sup> Cherif Tolba	Pr	Université Badji Mokhtar Annaba
*Examineurs :	M <sup>f</sup> Reciouï Abdelmadjid	Pr	Université de Bouméredes
	M <sup>f</sup> Abdsemed Foudil	Pr	Université Mostefa Ben Boulaid Batna 2
	M <sup>f</sup> Innal Fares	Pr	Université 20 Août 1955 Skikda

**Année universitaire 2024-2025**



---

# Remerciements

Avant d'entamer ce travail, je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers Allah, qui m'a accordé la force, la patience et le courage nécessaires pour mener à bien ces longues années d'études.

Je souhaite également adresser mes remerciements les plus sincères à toutes celles et ceux qui ont, de près ou de loin, contribué à l'aboutissement de cette thèse.

Je tiens à exprimer ma gratitude la plus profonde à mon directeur de thèse, Monsieur Youcef Zennir, Professeur à l'Université du 20-Août-1955 de Skikda. Son soutien indéfectible, sa disponibilité, et ses conseils éclairés ont été des piliers essentiels tout au long de mon parcours. Grâce à son expertise et à son accompagnement bienveillant, j'ai pu surmonter les défis scientifiques et personnels rencontrés durant cette aventure. Sa confiance en moi et sa sagesse ont été d'une importance capitale dans la réussite de ce travail. Je lui suis infiniment reconnaissant pour sa patience, son engagement, et sa vision, qui ont grandement contribué à la réalisation de ce projet. Je voudrais également remercier Monsieur Cherif Tolba, Professeur à l'Université Badji Mokhtar d'Annaba, pour son soutien constant. Sa collaboration précieuse, ses encouragements et ses conseils avisés ont constitué pour moi un appui inestimable tout au long de cette aventure scientifique.

Je remercie également avec beaucoup de gratitude Monsieur le directeur du laboratoire LRPCSI (Laboratory Skikda, Université 20 août 1955; 21000 Skikda; Algeria) pour son soutien.

Enfin, je saisis cette occasion pour exprimer ma reconnaissance infinie à mes proches, en particulier mes parents et tous les membres de ma famille, pour leur amour, leur patience et leur soutien indéfectible tout au long de ce parcours.

## ملخص :

يعد النقل البري للمواد الخطرة أمرًا بالغ الأهمية لصناعات مثل التصنيع والرعاية الصحية والطاقة لأن هذه المواد تشمل المواد الكيميائية والوقود والإمدادات الطبية الضرورية لمختلف العمليات. يسمح النقل البري الفعال لهذه البضائع بالوصول إلى الأماكن التي لا تكون فيها أشكال النقل الأخرى، مثل النقل بالسكك الحديدية أو النقل البحري، ممكنة.

ومع ذلك، وبسبب التعامل مع كميات كبيرة من المواد الخطرة، تتعرض الصناعات الكيميائية والمعالجة للحوادث، بما في ذلك الحرائق والانفجارات وانبعثات الغازات السامة. يمكن أن تسبب هذه الحوادث أضرارًا مدمرة للمرافق وتضر بالبشر وتلوث البيئة. إن طبيعة هذه الحوادث متعددة العوامل، حيث تساهم فيها العوامل التكنولوجية والتنظيمية والشخصية والظرفية والبيئية. ولذلك فمن الضروري تحديد هذه العوامل وإدارتها بشكل صحيح لتجنب تكرار الحوادث. ولذلك فإن النقل البري للمواد الخطرة يمثل مشكلة معقدة تتطلب لوائح صارمة وتحليلاً متعمقاً للمخاطر.

تقترح هذه الدراسة إطاراً متكاملًا يعتمد على تحليل شجرة الأخطاء الغامضة (FFTA)، و عملية التسلسل الهرمي التحليلي الغامض (FAHP) ونظام الاستدلال الغامض (FIS) لتقييم المخاطر الكمية المتعلقة بالبضائع الخطرة للنقل البري. يتم إجراء التحليل السببي باستخدام FTA، ويتم استشارة مجموعة متنوعة من أربعة خبراء لتقديم تعليقات حول احتمال حدوث كل حدث أساسي (BE)، معبراً عنه من الناحية النوعية. يتم تطبيق طريقة FAHP لتعيين أوزان لهذه الآراء بناءً على خلفيات الخبراء. يتم بعد ذلك تجميع النتائج وتحويلها إلى احتمالات باستخدام عدة معادلات. يتم الحصول على احتمالية كل BE، ويتم استخدام الجبر البولي لحساب احتمالية الحدث السلبي الأساسي. بالإضافة إلى ذلك، يتم حساب خطورة الحوادث المحتملة باستخدام FIS والمعادلات الهجينة، مع الأخذ في الاعتبار نوع المواد التي يتم نقلها والمخاطر المرتبطة بها.

علاوة على ذلك، يقدم هذا العمل نظام الاستدلال العصبي الغامض التكيفي (ANFIS) للتنبؤ بكل من تركيز المواد المنبعثة في الغلاف الجوي وتكلفة المخاطر (CR) المرتبطة بحوادث النقل البري للمواد الخطرة. الهدف هو توفير بيانات أكثر دقة وموثوقية لتحسين سلامة النقل. يمكن أن تؤدي الأساليب التقليدية، مثل الرسوم البيانية للمخاطر والأساليب الحتمية، إلى قيم غير دقيقة بسبب عدم اليقين في المعلمات والنماذج. التقنية المقترحة عبارة عن مخطط هجين يجمع بين مزايا المنطق الغامض (للتعامل مع حالات عدم اليقين) والشبكات العصبية (للتعلم من البيانات). لقد أدت الخوارزميات الفوقية المقترحة في هذا PSO و FA و ICA و HBBO إلى تحسين أداء التنبؤ للنموذج الذي تم النظر فيه بشكل كبير.

الكلمات المفتاحية: نقل المواد الخطرة، تحليل المخاطر، الذكاء الاصطناعي، المنطق الضبابي، العصبية الغامضة، الخوارزمية الفوقية الإرشادية، PSO، FA، HBBO، ICA.

## Résumé

L'acheminement routier de matières dangereuses est crucial pour des secteurs tels que l'industrie manufacturière, les soins de santé ou l'énergie, car ces matières comprennent des produits chimiques, des carburants et des fournitures médicales essentiels à divers processus. Un transport routier efficace permet d'acheminer ces marchandises vers des lieux où d'autres modes de transport, comme le rail ou le maritime, ne sont pas envisageables.

Cependant, en raison de la manipulation de grandes quantités de matières dangereuses, les industries chimiques et de transformation sont particulièrement exposées à des accidents tels que des incendies, des explosions ou des rejets de substances toxiques. Ces incidents peuvent entraîner des dommages considérables aux installations, mettre en danger la vie humaine et avoir un impact environnemental significatif. La nature de ces accidents est multifactorielle, impliquant des facteurs technologiques, organisationnels, humains, situationnels et environnementaux. Il est donc essentiel d'identifier et de maîtriser ces facteurs afin de prévenir la récurrence de tels événements. Le transport routier de matières dangereuses représente ainsi un enjeu complexe, nécessitant une réglementation rigoureuse et une évaluation approfondie des risques.

Cette étude propose un cadre intégré fondé sur l'analyse floue de l'arbre des défaillances (ADD), le processus de hiérarchisation analytique flou (FAHP) et le système d'inférence floue (FIS) pour évaluer les risques quantitatifs associés au transport routier de matières dangereuses. L'analyse causale est réalisée à l'aide de l'ADD, et un panel de quatre experts est consulté afin d'estimer, en termes qualitatifs, la probabilité de survenue de chaque événement élémentaire (BE). La méthode FAHP est utilisée pour pondérer ces estimations en fonction de l'expertise et des antécédents des experts. Les résultats sont ensuite agrégés et convertis en probabilités à l'aide de plusieurs équations spécifiques. La probabilité de chaque BE est ainsi déterminée, puis l'algèbre booléenne est appliquée pour estimer la probabilité de l'événement redouté principal. Par ailleurs, la gravité des accidents potentiels est évaluée à l'aide du FIS et d'équations hybrides, en prenant en compte le type de matière transportée et les dangers qui y sont associés.

Par ailleurs, ce travail introduit un système adaptatif basé sur l'ANFIS (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System) pour prédire à la fois la concentration de la matière libérée dans l'atmosphère et le coût du risque (CR) associé aux accidents survenant lors du transport routier de produits dangereux. L'objectif est de fournir des données plus précises et fiables afin de renforcer la sécurité du transport. Les méthodes conventionnelles, telles que les graphes de risque ou les approches déterministes, peuvent produire des résultats imprécis en raison des incertitudes inhérentes aux paramètres et aux modèles utilisés. La technique proposée repose sur un schéma hybride combinant les atouts de la logique floue pour la gestion des incertitudes et des réseaux de neurones pour l'apprentissage à partir des données. Par ailleurs, les algorithmes méta-heuristiques utilisés dans cette étude (PSO, FA, ICA et HBBO) ont significativement amélioré les performances prédictives du modèle considéré.

**Mots-clés :** *transport de matières dangereuses, analyse de risque, intelligence artificielle, logique floue, neuro-flou, algorithmes méta-heuristiques, PSO, FA, HBBO, ICA.*

### Abstract

The road transportation of hazardous materials is crucial for industries such as manufacturing, healthcare, and energy, as these materials include chemicals, fuels, and medical supplies essential to various processes. Efficient road transport ensures that these goods can reach locations where other modes of transportation, such as rail or maritime shipping, may not be feasible.

However, due to the handling of large quantities of hazardous materials, the chemical and process industries are particularly prone to incidents such as fires, explosions, and toxic releases. These incidents can cause devastating damage to facilities, endanger human life, and harm the environment. Their causes are multifactorial, involving technological, organizational, human, contextual, and environmental factors. Properly identifying and managing these factors is essential to prevent the recurrence of such accidents. As a result, the road transportation of hazardous materials is a complex issue that requires strict regulation and comprehensive risk analysis.

This study proposes a comprehensive framework based on ‘Fuzzy Fault Tree Analysis (FFTA), the Fuzzy Analytical Hierarchy Process (FAHP), and a Fuzzy Inference System (FIS)’ for assessing quantitative risk in the road transportation of hazardous materials. Causal analysis is conducted using FFTA, with a diverse panel of four experts providing qualitative assessments of the likelihood of each basic event (BE). FAHP is used to assign weights to these assessments based on the experts’ backgrounds. The weighted results are then aggregated and converted into probabilities using a series of equations. The probability of each BE is obtained, and Boolean algebra is applied to calculate the probability of the top (undesired) event. Additionally, the severity of potential accidents is evaluated using the FIS and hybrid equations, taking into account the nature of the transported material and the associated hazards.

Furthermore, this study introduces an Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS) to estimate both the concentration of leaked substances in the atmosphere and the cost of risk (CR) associated with accidents during the road transportation of hazardous materials. The objective is to provide more precise and reliable data to enhance transportation safety. Traditional methods, such as deterministic approaches and risk graphs, often produce inaccurate results due to uncertainties in both models and input parameters. The proposed method is a hybrid scheme that combines the strengths of fuzzy logic—used to represent uncertainty—and neural networks—used for their adaptability and learning capability. To improve the model’s performance, its parameters were optimized using meta-heuristic algorithms, including Particle Swarm Optimization (PSO), Firefly Algorithm (FA), Imperialist Competitive Algorithm (ICA), and Human-Based Behavior Optimization (HBBO).

**Keywords:** *transportation of hazardous materials, risk analysis, artificial intelligence, fuzzy logic, neuro-fuzzy systems, meta-heuristic algorithms, PSO, FA, HBBO, ICA.*

**Table des matières**

Remerciements .....	iii
Résumé .....	iv
Table des matières .....	vii
Table des figures .....	xii
Liste des tableaux .....	xv
Liste des abréviations .....	xvii
Introduction générale.....	xx
<b>Chapitre I : Etat de l’art des risques associés au TRMD .....</b>	<b>1</b>
I.1. Introduction.....	1
I.2. Les différents Modes de Transport et Réglementation applicable.....	1
I.2.1. Transport routier .....	2
I.3. Matière dangereuses.....	2
I.3.1. Dangers lies aux matières dangereuses .....	3
I.4. Réglementation internationale .....	3
I.5. Réglementation nationale.....	4
I.5.1. Historique présentation des règlements .....	4
I.5.2. Classification des matières dangereuses .....	4
I.5.3. Signalisation des transports.....	9
I.5.4. Le rôle de la signalisation dans un accident .....	13
I.5.5. La formation du personnel .....	13
I.5.6. Documents d’expédition .....	13
I.5.7. Le chargement des citernes .....	13
I.5.8. Équipement de sécurité .....	13
I.5.9. La circulation .....	14
I.5.10. L’organisation des secours.....	15
I.6. Les écarts dans la réglementation nationale par rapport à l’ADR .....	16
I.7. Risques associé au TMD.....	16
I.7.1 Types d’accident .....	17

I.7.2 Conséquences.....	18
I.8. Conclusion .....	18
<b>Chapitre II : Etat de l’art des méthodes d’analyse des risques .....</b>	<b>20</b>
II.1. Introduction .....	20
II.2. Concepts et définitions .....	20
II.2.1. Notion de danger.....	20
II.2.2. Notion du risque .....	21
II.2.3. Notion de criticité / Grille de criticité.....	22
II.2.4. Notion de sécurité .....	22
II.3. Processus de gestion des risques .....	23
II.3.1. Identification des risques .....	23
II.3.2. Analyse du risque .....	24
II.3.3. Évaluation du risque .....	25
II.3.3. Acceptation du risque .....	26
II.3.4. Réduction du risque .....	26
II.4. Classifications des méthodes d'analyse et d'évaluation des risques .....	26
II.4.1. Méthodes qualitatives .....	27
II.4.2. Méthodes semi-quantitatives .....	29
II.4.3. Méthodes quantitatives .....	30
II.5. Méthode d’analyse des risques .....	30
II.5.1. Arbre de défaillances (AdD).....	30
II.5.1.1. Principe de la méthode.....	31
II.5.1.2. Objectifs.....	31
II.5.1.3. Les entrées .....	31
II.5.1.4. Déroulement de la méthode .....	31
II.5.1.5. Sorties de la méthode.....	33
II.5.1.6. Avantages et limites de la méthode .....	33
II.5.2.1. Analyse Multicritère de la Décision .....	34
II.5.2.1.1. Principe de l’approche .....	35
II.5.2.1.2. Objectifs de l’approche.....	35

II.5.2.1.3. Les entries de l'approche .....	35
II.5.2.1.4. Déroulement de l'approche.....	35
II.5.2.1.5. Les sorties de l'approche .....	36
II.5.2.1.6. Les avantages et les inconvénients de l'approche .....	36
II.5.2.2. Processus hiérarchique analytique .....	36
II.5.2.3. Processus hiérarchique analytique flou .....	38
II.7. Conclusion .....	39
<b>Chapitre III : Intelligence artificiel et analyse de risque .....</b>	<b>40</b>
III.1. Introduction .....	40
III.2. Réseau de Neurones .....	40
III.2.1. Principe de l'approche.....	41
III.2.2. Objectifs de l'approche .....	42
III.3.3. Déroulement .....	43
III.3.4. Les avantages et les inconvénients de l'approche .....	43
III.3. La Logique Floue .....	43
III.3.1. Principe de l'approche.....	43
III.3.2. Objectifs de l'approche .....	44
II.3.3. Les entries du système flou.....	44
III.3.4. Déroulement .....	44
III.3.5. Les sorties de l'approche.....	45
II.3.6. Les avantages et les inconvénients de l'approche .....	45
III.4. Système d'inférence neuro-flou adaptatif .....	46
III.5. Les algorithmes méta-heuristiques.....	47
III.5.1. Optimisation par essaims de particules (PSO) .....	47
III.5.2. Algorithme de la luciole (FA) .....	49
III.5.3. Algorithme compétitif impérialiste (ICA).....	50
III.5.3.1. Initialisation.....	50
III.5.3.2. Assimilation.....	51
III.5.3.3. Concurrence interne.....	52
III.5.3.4. Coût total .....	52
III.5.3.5. Concurrence externe.....	52

III.5.3.6. Finalisation .....	52
III.5.4. Optimisation basée sur le comportement humain (HBBO).....	52
III.5.4.1. Initialisation.....	53
III.5.4.2. Education.....	54
III.5.4.3. Consultation.....	55
III.5.4.4. La probabilité de changement de domaine.....	55
III.5.4.5. Finalisation .....	56
III.6. Conclusion.....	56
<b>Chapitre IV : Approche intégrée pour l'évaluation du risque associé au TRMD.....</b>	<b>57</b>
IV.1. Introduction.....	57
IV.2. Méthodologie proposée.....	58
IV.2.1. Détermination de la probabilité.....	60
IV.2.1.1. Agrégation des données .....	61
IV.2.2. Détermination de la gravité.....	63
IV.2.2.1. Détermination du dommage inhérent.....	65
IV.2.2.2. Détermination du CF.....	66
IV.4. Résultats .....	67
IV.4.1. Détermination des probabilités .....	67
IV.4.2 Détermination du risque.....	72
IV.5. Conclusion .....	74
<b>Chapitre V : Système d'inférence neuro-flou adaptatif pour le TRMD .....</b>	<b>76</b>
V.1. Introduction .....	76
V.2. Model de dispersion de matière dangereuse.....	77
IV.2.1. Modèle SPM.....	77
IV.2.2. Modèle Gaussien.....	78
V.3. Résultats et discussion.....	78
V.3.1. Estimation de la concentration et gravite de la matière dangereuse avec ANFIS-PSO et FLC.....	78
V.3.1.1. ANFIS-PSO basé sur le modèle SPM .....	80
V.3.1.2. ANFIS-PSO basé sur le modèle Gauss Puff.....	84
V.3.1.3. Estimation de sévérité ave la logique floue .....	87

V.3.2. Estimation du cout de risque d'un accident avec ANFIS basé avec PSO, FA, ICA et HBBO .....	90
V.4. Conclusion.....	100
Conclusion générale et Perspectives .....	102
Bibliographie .....	104

## Table des figures

Figure I.1 Pictogramme de signalisation de TMD vierge .....	10
Figure I.2 Pictogramme de signalisation de TMD .....	11
Figure I.3 Exemple de signalisation d'un camion-citerne transportant des carburants.....	11
Figure I.4 Exemple de signalisation d'un camion-citerne à compartiment.....	12
Figure I.5 Signalisation des colis et bouteilles de gaz.....	12
Figure I.6 Signalisation des camions non citerne.....	13
Figure I.7 Signalisation du code de la route.....	15
Figure II.1 Les étapes de la gestion des risques .....	23
Figure II.2 Type de techniques d'analyse de risque .....	27
Figure II.3 Principe de la méthode AHP .....	37
Figure III.1 Exemple d'un réseau de neurones artificiels .....	40
Figure III.2 Structure d'un MLP 3 .....	42
Figure III.3 Les étapes de la logique floue.....	44
Figure III.4 La structure de L'INFIS.....	46
Figure III.5 Les étapes de l'algorithme PSO.....	48
Figure III.6 Organigramme de l'algorithme FA .....	49
Figure III.7 Répartition des colonies entre les empires.....	51
Figure III.8 Engager et diviser les peuples à travers les domaines initiaux.....	53
Figure III.9 L'éducation se déplace autour de l'expert .....	54
Figure III.10 Mécanisme de consultation.....	55
Figure IV.1 Architecture du modèle proposé.....	59
Figure IV.2 Le modèle proposé pour la détermination des probabilités .....	60
Figure IV.3 AHP floue pour la pondération des experts.....	61
Figure IV.4 Le cadre proposé pour le calcul de la gravité .....	64
Figure IV.5 Système d'inférence floue pour le calcul des CF.....	67
Figure IV.6.a Diagramme FTA de la libération de produits chimiques.....	68
Figure IV.6.b Diagramme FTA de la libération de produits chimiques .....	69

Figure IV.7 Nombre flou correspondant aux possibilités des évènements de base .....	70
Figure IV.8 Fonction d'appartenance pour les entrées et la CF .....	73
Figure IV.9 Facteur de conséquence de la libération de produit chimique.....	73
Figure IV.10 Valeur du risque de dissémination chimique.....	74
Figure V.1 Organigramme de la méthodologie.....	79
Figure V.2 Schéma de principe pour la résolution des problèmes liés aux matières dangereuses sur la base du modèle SPM .....	82
Figure V.3 La réponse d'ANFIS-PSO basée sur le modèle SPM dans la phase de formation	84
Figure V.4 La réponse d'ANFIS-PSO basée sur le modèle SPM des données d'essai .....	84
Figure V.5 Schéma de principe pour la résolution des problèmes liés aux matières dangereuses, basé sur le modèle de la bouffée de Gauss .....	86
Figure V.6 Les performances d'ANFIS-PSO basées sur le modèle de bouffée de Gauss dans la phase d'apprentissage .....	87
Figure V.7 Les performances d'ANFIS-PSO basées sur le modèle de bouffée de Gauss dans la phase d'essai .....	87
Figure V.8 Fonctions d'appartenance pour les entrées et les sorties de la FL.....	88
Figure V.9 Gravité pour différentes tranches d'âge.....	89
Figure V.10 Cadre hiérarchique des causes et conséquences des accidents de la route .....	90
Figure V.11 Principales étapes de l'ANFIS pour déterminer la valeur CR.....	91
Figure V.12 ANFIS basés sur PSO, FA, ICA et HBBO .....	93
Figure V.13 Le chemin qui relie le POI aux stations NIS.....	93
Figure V.14 Les résultats de l'ANFIS-PSO de la valeur CR pour les données d'apprentissage .....	95
Figure V.15 Les résultats de l'ANFIS-PSO de la valeur CR pour les données d'essai .....	95
Figure V.16 Les résultats de l'ANFIS-FA de la valeur CR pour les données d'apprentissage	96
Figure V.17 Les résultats de l'ANFIS-FA de la valeur CR pour les données d'essai.....	96
Figure V.18 Les résultats de l'ANFIS-HBBO de la valeur CR pour les données d'apprentissage .....	97
Figure V.19 Les résultats de l'ANFIS-HBBO de la valeur CR pour les données d'essai .....	97
Figure V.20 Les résultats de l'ANFIS-ICA de la valeur CR pour les données d'apprentissage .....	98
Figure V.21 Les résultats de l'ANFIS-ICA de la valeur CR pour les données d'essai.....	98

*Table des figures*

---

Figure V.22 Les résultats de l'ANFIS-PSO pour la phase d'apprentissage .....	100
Figure V.23 Les résultats de l'ANFIS-PSO pour la phase de test .....	100

## Liste des tableaux

Tableau I.1 Modes de transport de marchandise dangereuses et règlements internationaux français et Algériens.....	1
Tableau I.2 Le classement des marchandises dangereuses en fonction du danger qu'elles présentent .....	5
Tableau I.3 Pictogramme des différentes matières .....	6
Tableau I.4 Exemples de code O.N.U pour les MD.....	9
Tableau I.5 Déchiffrage du numéro de code danger .....	10
Tableau II.1. Matrice d'évaluation des risques .....	28
Table II.2. Matrice d'évaluation des risques .....	29
Table II.3. Facteurs associés au risque inhérent.....	30
Table II.4. Les principaux éléments de l'ADD .....	32
Table II.5. Échelle de comparaison utilisée pour la comparaison paire à paire.....	37
Table II.6. Nombre triangulaire flou .....	38
Table III.1 Fonction d'activation fréquemment utilisées dans les réseaux de neurones.....	41
Table IV.1 Termes qualitatifs et ensembles flous .....	62
Tableau IV.2 Valeurs attribuées aux dangers en fonction du type d'accident.....	65
Tableau IV.3 Dangers des produits chimiques.....	65
Tableau IV.4 Evènements de base identifiées et jugements des experts concernant leurs possibilités.....	69
Tableau IV.5 Informations sur les experts .....	71
Tableau IV.6. Valeurs agrégées des évènements de base .....	71
Tableau V.1 Données dérivées de l'expérience Prairie Grass .....	80
Tableau V.2 Paramètres d'ANFIS-PSO pour le modèle SPM .....	82
Tableau V.3 Les indices statistiques obtenus par l'approche proposée .....	84
Tableau V.4 Données obtenues par le logiciel ALOHA sur la base des données météorologiques de l'expérience Prairie Grass .....	84
Tableau V.5 Paramètres d'ANFIS-PSO pour le modèle Gauss Puff.....	85
Tableau V.6 Les indices statistiques obtenus par l'approche proposée .....	86
Tableau V.7 Les règles d'inférences floué.....	88

Tableau IV.8 La classification des entrées et des sorties pour le matériel libéré.....	89
Tableau IV.9 Critères de définition des valeurs de CR sur un réseau de transport routier urbain.....	92
Tableau IV.10 Les paramètres des algorithmes proposés .....	94

### **Liste des abréviations**

TMD	Transport de Matières Dangereuses
ADR	L'Accord européen sur le transport des marchandises dangereuses par route
RID	Règlement International concernant le transport des marchandises Dangereuses par chemin de fer
ADNR	Accord européen relatif au transport international des marchandises dangereuses par voies de navigation intérieures
ICAO	International Civil Aviation Organization
IMO	International Maritime Organization
TRMD	Transport Routier de Matière Dangereuse
ONU	Organisation des Nations Unies
TNT	Trinitrotoluène
ICSC	International Chemical Safety Card
GPL	Gaz de pétrole liquéfié
TMD	Transport de Matières Dangereuses
VTRMD	Véhicule Transport Routier de Matière Dangereuse
NAFTAL	Société nationale de commercialisation et de distribution des produits pétroliers et gaziers
ISO	International Organization for Standardization
OHSAS	Occupational Health and Safety Assessment Series
HAZOP	Hazard and Operability Study
ALARP	As Low As Reasonably Practicable
ADD	Arbre de Défaillances
IEC	International Electro-technical Commission
MCDM	Multi-Criteria Decision Making
AMDEC	Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets

*Liste des abréviations*

---

ALOHA	Areal Locations of Hazardous Atmospheres
AHP	Analytic Hierarchy processes
TOPSIS	Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution
DEA	Data Envelopment Analysis
FIS	Fuzzy Inference System
BE	Basic Event
IE	Intermediate Event
TE	Top Event
CoA	Centre of Area
ANFIS	Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System
PSO	Particle Swarm Optimization
GA	Genetic Algorithm
GS	Grid Search
RBF	Radial Basis Function
FA	Firefly Algorithm
FL	Fuzzy Logic
ICA	Imperialist Competitive Algorithm
HBBO	Human Behavior-Based Optimization
SPM	Skewed Puff Model
NMSE	Normalized Mean Square Error
RMSE	Root Mean Square Error
MSE	Mean Square Error
R	Correlation Factor
FAC2	Factor Two of observations
FB	Fraction Bias

*Liste des abréviations*

---

AEGL	Acute Exposure Guideline Levels
CR	Cout de Risque

# **Introduction Générale**

## **Introduction général**

### **Problématique et contexte de l'étude**

Durant les dernières décennies, l'expansion urbaine et la création de nouvelles villes se sont intensifiées afin de répondre aux besoins économiques et sociétaux. Pour absorber les flux croissants de personnes et de matières, les infrastructures routières se sont multipliées, engendrant un trafic particulièrement dense qui nécessite l'élaboration de plans de circulation rigoureux. Toutefois, le transport de matières dangereuses peut entraîner des conséquences désastreuses pour l'écosystème et pour la population, en particulier lorsque les conditions de circulation se détériorent (intempéries, embouteillages, travaux, accidents). En effet, la survenue de plusieurs incidents sur les routes a renforcé la vigilance quant à la sécurité du transport routier de ces matières. La complexité des interventions nécessaires en cas d'accident allonge considérablement les délais de rétablissement de la circulation normale, provoquant d'importantes pertes économiques et un fort inconfort pour les usagers. Il est donc essentiel de pouvoir anticiper les risques liés à la logistique de ces matières et de mettre en œuvre des mesures efficaces afin de renforcer leur sécurité [1].

L'approvisionnement d'une ville en matières dangereuses constitue une activité socioéconomique essentielle, mais elle comporte de nombreux risques. Ces risques sont amplifiés par la nature intrinsèquement dangereuse des matières transportées. Le partage des voies de circulation entre les véhicules de transport de matières dangereuses (VTMD) et les autres usagers, combiné à leur exposition aux aléas courants du trafic, peut conduire à des situations de risque majeur [2].

Le transport routier de matières dangereuses (TRMD) est classé parmi les risques technologiques majeurs par la directive SEVESO II, aux côtés des risques industriels, nucléaires, chimiques, biologiques et de rupture de barrage. En raison de leur gravité et de leur potentiel de destruction, ces risques suscitent une méfiance croissante à l'égard de la technologie moderne et génèrent une forte inquiétude au sein des populations. Ils se caractérisent par des événements extrêmes, susceptibles de dépasser les limites de temps et d'espace, dont la nature et les conséquences peuvent échapper à tout contrôle humain, comme l'ont illustré les catastrophes de Tchernobyl (1986), Bhopal (1984) et Seveso (1976) [2–3].

Le risque associé au transport routier de matières dangereuses (TRMD) se distingue des autres risques technologiques par son caractère diffus et mobile. En traversant des zones densément urbanisées, le TRMD constitue une menace pour l'ensemble de la population, l'environnement et les écosystèmes, exposant ces derniers à des dangers tels que les incendies, explosions, pollutions ou émissions de vapeurs toxiques. Les causes potentielles de ces risques sont multiples : mauvais état des véhicules (notamment des camions citernes), erreurs humaines, conditions de circulation, dégradation des infrastructures routières, intempéries, ou encore aménagement urbain inadéquat. Face à cette complexité, les pays développés ont rapidement mis en place des stratégies d'analyse et de gestion spécifiques pour limiter les conséquences de tels incidents [4].

L'acheminement des matières dangereuses par voie routière constitue un enjeu majeur mobilisant des domaines pluridisciplinaires. Il présente de nombreux défis, notamment en matière de conception des réseaux routiers, de modélisation des risques, de développement d'outils d'aide à la décision, ainsi que d'études de routage et d'ordonnement des véhicules.

Compte tenu des enjeux économiques et sécuritaires, la gestion du TRMD représente l'un des problèmes les plus cruciaux, nécessitant une attention particulière. De manière générale, les méthodes utilisées pour estimer les risques d'accidents liés au transport de produits dangereux se répartissent en deux grandes catégories : les approches qualitatives et les approches quantitatives [5–6].

La méthode qualitative de gestion des risques se concentre principalement sur l'identification des facteurs susceptibles de contribuer aux accidents de transport. Bien que cette approche soit intuitive et utile pour une première évaluation, elle ne permet pas de quantifier précisément le niveau de risque. À l'inverse, l'approche quantitative permet de modéliser avec plus de précision la relation entre les facteurs d'influence et le risque d'accident lié au TRMD. Ces dernières années, grâce au développement de l'Internet des objets, des technologies de communication, de l'intelligence artificielle et d'autres innovations technologiques, de nombreux systèmes de surveillance et d'alerte précoce ont été conçus afin de renforcer la sécurité du transport de matières dangereuses [7].

Dans ce contexte, cette thèse a pour objectif principal de développer des techniques quantitatives de gestion des risques liés au transport routier de matières dangereuses (TRMD), en s'appuyant sur des méthodes issues de l'analyse des risques et de l'intelligence artificielle. Dans une première phase, nous proposons une approche visant à identifier et évaluer les risques potentiels associés au TRMD. Parallèlement, nous développons des méthodes de maîtrise de ces risques. Par la suite, un système d'aide à la décision est conçu, en conformité avec les exigences spécifiques à ce domaine. Cette architecture permet d'estimer le risque lié au TRMD. Elle se distingue par sa capacité à fournir une estimation optimale, à intégrer les incertitudes inhérentes au processus décisionnel, et à limiter l'intervention humaine.

### Contributions de la thèse

Principales contributions de cette thèse :

- Développement d'une méthodologie complète d'évaluation des risques dans les systèmes complexes, fondée sur un ensemble de méthodes complémentaires permettant d'analyser le système selon plusieurs perspectives.
- Amélioration de l'analyse par l'Arbre de Défaillances (ADD), utilisée comme méthode qualitative et quantitative. L'accès difficile aux données nécessaires pour une analyse qualitative rend crucial le recours à l'expertise humaine. Cependant, les incertitudes et les biais des experts peuvent affecter la fiabilité des résultats. Pour pallier ces limites, nous avons combiné l'ADD avec la logique floue et la méthode FAHP (Fuzzy Analytic Hierarchy Process). La logique floue permet de modéliser les incertitudes, tandis que la méthode FAHP est utilisée pour pondérer les jugements des experts selon des critères tels que le niveau d'études, l'expérience ou l'âge, réduisant ainsi l'influence disproportionnée d'un expert individuel.
- Prise en compte de la nature mobile et diffuse du risque lié au TRMD, dont la gravité dépend du lieu de l'accident, du type de matière transportée et du type d'incident (collision, explosion, fuite, incendie, etc.). Pour évaluer l'intensité de ces risques, nous avons proposé l'intégration de la logique floue et d'équations spécifiques.
- Proposition d'un système ANFIS (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System) afin de surmonter les difficultés liées à la sollicitation manuelle des experts, en particulier dans l'estimation des probabilités des événements de base et des règles floues. Cette solution permet d'automatiser l'inférence tout en tenant compte de la complexité des facteurs influençant l'intensité du risque.

- Optimisation des performances du système ANFIS à l'aide de plusieurs algorithmes méta-heuristiques, comparés afin d'identifier les solutions les plus efficaces en termes de précision et de robustesse.

### **Organisation du manuscrit**

Cette thèse est structurée en cinq chapitres.

À la suite de l'introduction générale, le premier chapitre présente les notions théoriques relatives aux risques associés au transport routier de matières dangereuses. Il expose ensuite le cadre juridique encadrant l'acheminement de ces matières par voie routière en Algérie.

Le deuxième chapitre introduit les notions préliminaires relatives aux concepts de risque, de gestion des risques et de sécurité, en détaillant les principales étapes de cette dernière. Il propose ensuite une revue des techniques d'analyse et d'identification des risques développées dans la littérature, notamment l'Analyse Multicritère de la Décision et l'ADD.

Le troisième chapitre présente un aperçu général des méthodes couramment utilisées en intelligence artificielle. Il couvre notamment les réseaux de neurones, la logique floue ainsi que divers algorithmes méta-heuristiques, parmi lesquels « l'Optimisation par Essaim de Particules (PSO), l'Algorithme des Lucioles (FA), l'Algorithme Impérialiste Compétitif (ICA) et l'Optimisation Basée sur le Comportement Humain (HBBO) ».

Le quatrième chapitre, afin de pallier les limites et de tirer parti des avantages des méthodes présentées au deuxième chapitre, propose une approche hybride combinant l'AHP floue, l'arbre de défaillance et la logique floue. Les résultats obtenus sont analysés sous l'angle de la sécurité, à travers une application concrète au transport routier de matières dangereuses.

Le cinquième chapitre est consacré au développement d'un outil d'aide à la décision fondé sur l'application du Système d'Inférence Neuro-Floue Adaptatif (ANFIS). Les performances du modèle proposé ont été optimisées grâce à plusieurs algorithmes méta-heuristiques d'optimisation, notamment PSO, FA, ICA et HBBO. Cette méthode a été employée pour estimer le coût du risque lié à l'acheminement de matières dangereuses ainsi que la concentration des matières rejetées dans l'atmosphère.

Ce manuscrit se conclut par une synthèse globale des travaux réalisés et propose des pistes pour des recherches futures.

## **CHAPITRE I**

### ***Etat de l'art des risques associés au TRMD***

## I.1. Introduction

L'industrie chimique a une importance cruciale pour le bien-être des citoyens. Ce secteur est composé d'entreprises qui produisent des produits chimiques de niveau industriel, et ces produits chimiques sont utilisés dans de nombreux aspects de la vie humaine, notamment dans la transformation du pétrole, du gaz naturel, de l'air, de l'eau, des métaux et des minéraux en produits utilisables. Dans le contexte des infrastructures critiques, le transport de ces produits a été identifié comme l'un des piliers d'une économie prospère [1].

Le transport désigne simplement les moyens permettant de déplacer des biens ou des personnes d'un endroit à un autre. Dans le contexte des produits chimiques, il s'agit spécifiquement du déplacement de substances chimiques entre différents sites. Ce transport peut s'effectuer par divers modes : terrestre, maritime ou aérien. Le rôle du système de transport, en particulier pour les marchandises dangereuses, est d'assurer un acheminement rapide, sûr et sécurisé des produits et des personnes, à travers les rues, les villes, les régions et les pays. Toutefois, cette mission est complexe et comporte des risques importants, comme en témoignent les accidents impliquant des substances dangereuses et leurs conséquences sur la santé humaine et l'environnement. C'est pourquoi des mesures proactives, telles que des réglementations strictes et des évaluations des risques rigoureuses, doivent être mises en œuvre de manière appropriée et proportionnée [2].

Le présent chapitre met l'accent sur les réglementations et les risques associés au transport de matières dangereuses par voie routière.

## I.2. Les différents Modes de Transport et Réglementation applicable

Le transport de matières dangereuses recouvre plusieurs modes de circulation, tels que le rail, la route, l'avion, la voie maritime, la voie fluviale ainsi que les canalisations. Chaque mode ayant ses propres caractéristiques, une législation spécifique s'applique à chacun d'entre eux. Ainsi, la réglementation dans ce domaine est particulièrement détaillée et rigoureuse. L'ensemble de ces textes vise à assurer la sécurité en définissant les modalités de contrôle, les exigences techniques des moyens de transport et la formation obligatoire du personnel intervenant. Le tableau suivant présente les différents modes de transport ainsi que la réglementation qui leur est applicable.

Tableau I.1 Modes de transport de marchandise dangereuses et règlements internationaux français et Algériens [3].

Mode de transport	Règlements		
	Règlements internationaux	Règlements en droits français	Règlements en droit Algérien
Mode Routier	ADR ("L'Accord européen sur le transport des marchandises dangereuses par route")	Arrêté ADR	Décret exécutif n° 03-452
Rail	RID ("Règlement International concernant le transport des marchandises Dangereuses par chemin de fer")	Arrêté RID	

---

Fluvial	ADNR ("Accord européen relatif au transport international des marchandises dangereuses par voies de navigation intérieures")	Arrêté ADNR	
Air	ICAO ("International Civil Aviation Organization")		l'arrêté du 7 Octobre 1964
Mer	IMO ("International Maritime Organization")		

### I.2.1. Transport routier

Le transport routier est un mode polyvalent, capable d'acheminer des matières dangereuses en choisissant librement ses itinéraires. Il se distingue également par sa grande souplesse d'utilisation. Grâce à cette flexibilité, les camions assurent efficacement le transport des produits finis depuis les sites de production jusqu'aux centres de stockage, ainsi que la distribution vers les revendeurs à partir des dépôts. Cela en fait le canal logistique le plus proche du consommateur final.

Le transport routier assure la distribution des marchandises dangereuses à l'échelle urbaine, ce qui engendre plusieurs difficultés liées à la dispersion géographique des consommateurs, à la diversité des produits transportés et aux quantités variables à livrer. Les produits concernés présentent plusieurs centaines de spécifications différentes, chacune pouvant être commandée en volumes allant de 2 litres à plusieurs tonnes. Ces substances, de nature variée (gaz, liquides ou solides), présentent souvent un caractère dangereux [4].

En outre, le transport routier constitue un système dynamique en interaction constante avec son environnement extérieur, et peut être décomposé en plusieurs sous-systèmes. Il dépend notamment du niveau technologique des camions citernes, du contexte naturel (tels que la géométrie des routes, l'état de la chaussée, les conditions météorologiques), ainsi que du milieu socio-économique (comprenant, par exemple, le niveau de formation des conducteurs ou le budget de l'entreprise pour l'acquisition de véhicules).

Les interactions entre le transport routier et son environnement extérieur sont à l'origine de nombreux accidents de la circulation. Lorsqu'ils impliquent des matières dangereuses, ces accidents peuvent avoir des conséquences bien plus graves que les collisions ordinaires. En effet, un accident impliquant une substance dangereuse peut provoquer un effet primaire immédiat tel qu'un déversement, un incendie ou une explosion ainsi que des effets secondaires, comme la dispersion de vapeurs toxiques ou la contamination des sols et des eaux.

De ce fait, il est essentiel d'évaluer le risque associé au transport routier de marchandises dangereuses, ce mode représentant à lui seul 75 % du tonnage total transporté. La problématique du TRMD réside notamment dans sa proximité avec les zones urbanisées, son caractère diffus, ainsi que dans les enjeux qu'il soulève — qu'ils soient humains, environnementaux ou matériels. La survenue d'un accident est caractérisée non seulement par une probabilité, dont l'estimation reste complexe et incertaine, mais également par des conséquences difficilement prévisibles, tant sur le plan qualitatif que quantitatif [8, 9].

### I.3. Matière dangereuses

Une matière dangereuse est toute substance utilisée dans notre quotidien, que ce soit

directement (liquides, gaz, carburants, etc.) ou indirectement (bitume, pesticides, engrais, etc.), et qui circule intensément sur nos routes. Ces substances peuvent entraîner des conséquences graves pour les biens, la population et l'environnement, en raison de leurs caractéristiques physico-chimiques ou des réactions chimiques secondaires qu'elles peuvent provoquer [10]. De fait, les matières transportées sont souvent des produits pétroliers de nature chimique. Elles peuvent être toxiques, corrosives, explosives, inflammables, et présenter de nombreux risques.

### I.3.1. Dangers liés aux matières dangereuses

- **Le danger d'explosion** : la possibilité qu'un produit se décompose de manière violente sous l'effet d'un choc ou de la chaleur, provoquant ainsi une explosion.
- **Le danger de fuite** : libération non contrôlée d'une substance, ici d'un gaz, pouvant entraîner des conséquences potentiellement dangereuses en raison des propriétés spécifiques du gaz, telles que son inflammabilité, sa toxicité ou sa corrosivité.
- **L'inflammabilité** (identifiée par le point éclair d'une substance) : caractéristique d'un matériau pouvant s'enflammer rapidement au contact d'une source d'ignition.
- **La toxicité** : caractéristique d'une matière capable de provoquer une intoxication par ingestion, inhalation ou absorption cutanée, entraînant des dommages pour la santé, voire la mort.
- **La corrosivité** : propriété d'une matière capable d'endommager ou de ronger les tissus vivants ou les matériaux avec lesquels elle entre en contact.
- **le danger infectieux** : capacité d'une matière à provoquer des pathologies sévères chez l'être humain ou les animaux. Ce danger concerne notamment les substances contenant des agents pathogènes tels que bactéries et virus.
- **le danger de réaction violente spontanée** : propriété d'une matière à réagir spontanément et vivement, pouvant provoquer une explosion accompagnée de la libération de gaz toxiques ou inflammables sous haute pression, ainsi que d'une production importante de chaleur.

### I.4. Réglementation internationale

Dans cette section, nous nous concentrerons sur le transport routier de produits dangereux, car c'est le mode le plus exposé aux risques d'accidents. Les causes des accidents sont multiples : erreurs de conduite du conducteur ou d'un tiers, état du véhicule, conditions météorologiques défavorables, mauvaise qualité des routes, etc.

Par ailleurs, les modes de stockage, la nature des produits transportés et les méthodes de transport peuvent constituer des facteurs de risque supplémentaires.

En Europe, le transport routier de matières dangereuses est encadré par l'ADR — l'Accord européen relatif au transport international des marchandises dangereuses par route. Cet accord vise principalement à renforcer la sécurité du transport routier international, tout en facilitant les échanges commerciaux. Bien que la participation à l'ADR ne soit pas limitée aux seuls pays de l'Union européenne, ses exigences ont été intégrées à la directive 94/55/CE du Conseil de l'Union européenne, qui harmonise les législations des États membres concernant le transport des marchandises dangereuses. Par conséquent, ces exigences s'appliquent non seulement au transport international, mais aussi au transport national dans tous les pays de l'Union européenne. Chaque État membre transpose cette directive dans son propre cadre réglementaire, où les réglementations nationales peuvent prévaloir, notamment lorsqu'elles imposent des exigences supplémentaires ou plus strictes.

## I.5. Réglementation nationale

L'Algérie n'a pas ratifié l'ADR, contrairement au Maroc et à la Tunisie, qui ont tous deux adhéré à cet accord au sein du Maghreb.

### I.5.1. Historique : présentation des règlements

Dans cette section, nous aborderons l'évolution de la réglementation algérienne relative au TRMD en deux périodes, afin de mettre en évidence les améliorations apportées.

- Première période : 1963- 1989

- En 1963, l'Office National des Transports (ONT) est créé en tant qu'établissement public à caractère industriel et commercial, chargé d'exécuter les missions qui lui sont confiées par la loi n°63-283 du 1er août 1963, dans le cadre défini par le décret exécutif n°63-429 du 7 novembre 1963 relatif à l'organisation et aux attributions de l'ONT [11].
- En 1964, par l'arrêté du 7 octobre 1964, pris en application de la loi 64-166, une réglementation spécifique relative au transport des produits dangereux par voie aérienne a été instaurée [12].
- En 1964, l'arrêté du 8 décembre 1964 a établi les règles relatives à la répartition du trafic de matières entre le chemin de fer et la route [13].
- En 1967, le décret du 22 juillet a fixé les modalités d'application de l'ordonnance n° 67-130, relative à l'organisation des transports terrestres [14].
- En 1985, le décret n° 85-231 du 25 août a fixé les principes et mécanismes régissant l'organisation et la mise en œuvre des interventions d'urgence en cas de catastrophe, conformément à la loi n° 85-05 du 16 février 1985 relative à la protection et à la promotion de la santé [15].

- Deuxième période : 1990- 2003

- En 1990, le décret exécutif n° 90-79 du 27 février a établi la réglementation du trafic des produits dangereux, en application de la loi n° 88-17 du 10 mai 1988 relative à l'organisation du transport par voie routière. Ce décret a été abrogé le 1er décembre 2003 [16].
- En 2001, la loi n° 01-13 du 17 Joumada El Oula 1422 (correspondant au 7 août 2001) porte sur l'organisation et l'orientation du transport routier, avec une attention particulière portée à son article 38 [17].
- En 2001, la loi n° 01-14 du 29 Joumada El Oula 1422 (correspondant au 19 août 2001) porte sur la police de la circulation routière, la sécurité et l'organisation, avec une attention particulière à son article 3 (code de la route) [18-20].
- En 2003, le décret exécutif n° 03-452 du 7 Choual 1424 (correspondant au 1er décembre 2003) fixe les conditions particulières relatives au transport routier de matières dangereuses, en application de l'article 38 de la loi n° 01-13 du 17 Joumada El Oula 1422 (7 août 2001) susvisée [21].



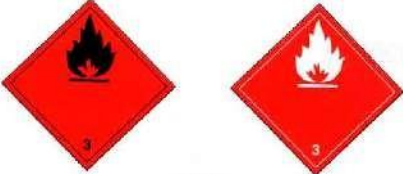

### I.5.2. Classification des matières dangereuses





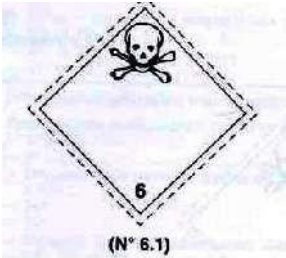
'L'article 4 du décret exécutif n° 03-452' classe les substances dangereuses en neuf catégories, présentées dans le tableau I.2. Cette classification suit les recommandations de l'ONU, en tenant compte de la nature du danger que chaque substance présente ainsi que de ses caractéristiques propres. Le tableau I.3 illustre les pictogrammes correspondants aux différentes marchandises dangereuses.



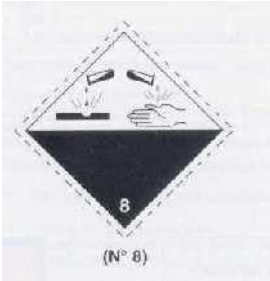

Tableau I.2 Le classement des marchandises dangereuses en fonction du danger qu'elles présentent [22].

Catégories	Définitions	Exemples	Danger
1	Matières explosives	Nitroglycérine, Dynamite, TNT (trinitrotoluène), etc.	Explosion
2	Gaz dissous sous pression, comprimés ou liquéfiés	Ammoniac, Chlore, Gaz propane etc.	Etats gazeux
3	Matières liquides inflammables	Toluene, Benzène, Xylène, etc.	Incendie
4.1	Matières solides inflammables	Bois, Tissus et textiles, etc.	Incendie
4.2	Matières sujettes à l'inflammation spontanée	Magnésium, Sulfure de fer, Phosphore blanc, etc.	Divers
4.3	Matières qui dégagent un gaz inflammable au contact de l'eau	potassium métallique, phosphore d'aluminium, magnésium métallique, etc.	Divers
5.1	Matières comburantes	Dioxyde de chlore, Chlorate de sodium, Persulfate d'ammonium etc.	Incendie
5.2	Peroxydes organiques	Peroxyde de benzoyle, d'hydrogène, d'acétone, etc.	Divers
6.1	Matières toxiques	Arsenic, Cyanure, Mercure, etc.	Intoxication
6.2	Matières infectieuses	Produits sanguins dérivés, Vaccins vivants atténués ou inactivés, etc.	Divers
7	Matières radioactives	Plutonium, Tritium, Césium-137, etc.	Radioactivité
8	Matières corrosives	Acid nitrique, Acide sulfurique, etc.	Corrosion
9	Matières dangereuses diverses	l'uranium, le plomb, l'ammoniac, etc.	Divers

Tableau I.3 Pictogramme des différentes matières [22]

Numéro de classe	Type de danger	Plaque et étiquette
1	Matières explosives	 <p>(N° 1)</p>
2	Gaz dissous sous pression, comprimés ou liquéfiés	 <p>(N° 2.2) Gaz ininflammables, non toxiques</p>
3	Matières liquides inflammables	 <p>(N° 3)</p>
4.1	Matières Solides inflammables	 <p>(N° 4.1)</p>

4.2	Matières sujettes à l'inflammation spontanée	 <p>(N° 4.2)</p>
4.3	Matières qui dégagent un gaz inflammable au contact de l'eau	 <p>(N° 4.3)</p>
5.1	Matières comburantes	 <p>5.1 (N° 5.1)</p>
5.2	Peroxydes organiques	 <p>5.2 (N° 5.2)</p>
6.1	Matières toxiques	 <p>6 (N° 6.1)</p>

6.2	Matières infectieuses	
7	Matières radioactives	
8	Matières corrosives	
9	Matières dangereuses diverses	

Les matières dangereuses sont identifiées, répertoriées et classées en fonction de leurs caractéristiques physico-chimiques et des dangers qu'elles présentent. Chaque matière dangereuse se voit attribuer un numéro ONU spécifique, utilisé pour son identification lors du transport ainsi que pour d'autres fins réglementaires et de sécurité. Ce numéro, composé de quatre chiffres, est assigné par le système des Nations unies. Plus de 3 000 substances sont actuellement répertoriées dans ce système de classification. L'International « Chemical Safety Card (ICSC) » fournit des informations relatives à la sécurité chimique pour un grand nombre de ces matières.

En revanche, les volumes et les niveaux de danger des 13 classes et sous-classes varient considérablement. Par exemple, la classe 2 regroupe tous les types de gaz, qu'ils soient inflammables, corrosifs, comburants ou inertes.

Un numéro à quatre chiffres est attribué à chaque matière dangereuse selon la nomenclature de l'ONU, qui recense plusieurs milliers de substances. Ce numéro a pour objectif d'identifier précisément le produit transporté. Le tableau suivant présente quelques exemples

de matières dangereuses (MD) avec leur code ONU correspondant [23]. Le tableau I.4 illustre un exemple de code ONU.

Tableau I.4 Exemples de code O.N.U pour les MD [24]

Numéro	Matières
1202	Gazole
1075	"Gaz de pétrole liquéfié (G.P.L) "
1203	Essence
1999	"Asphalte"
1789	Acide chloridrique
1223	"Kérosène"
2978	Hexafluorure d'uranium
1066	Azote
1072	Oxygène
1049	Hydrogène

### I.5.3. Signalisation des transports

Conformément à l'article 15 du décret exécutif n° 03-452, chaque véhicule transportant des substances dangereuses doit être doté d'une signalisation claire pour chaque catégorie, permettant d'identifier aisément la nature des dangers potentiels associés.

Le véhicule automobile doit être adapté aux caractéristiques et à la nature des matières dangereuses transportées.

Conformément à l'article 9 du décret exécutif n° 03-452, des étiquettes indélébiles et clairement lisibles doivent être apposées de manière visible sur tout colis contenant une matière dangereuse, afin d'identifier depuis l'extérieur la nature de la marchandise ainsi que les risques qu'elle présente. Cela permet de prendre les mesures de précaution appropriées.

Un numéro d'identification est attribué à chaque matière dangereuse afin de permettre une reconnaissance précise du type de produit transporté.

Le numéro d'identification, ou code matière (indiqué en partie inférieure de l'étiquette), est composé de quatre chiffres conformément à la nomenclature de l'ONU (voir tableau I.4).

Le code danger : le nombre figurant en haut du panneau orange signale les types de dangers probables liés au produit transporté. Le premier chiffre représente le danger principal, tandis que le second et le troisième indiquent les dangers secondaires (voir tableau I.5). Si la substance ne présente pas de danger secondaire, le deuxième chiffre est remplacé par un zéro. Par exemple, le code 36 signifie « toxique et inflammable ». Lorsque le même chiffre est répété deux fois, cela indique une amplification du risque ; ainsi, 33 signifie « extrêmement inflammable ». Ce code peut être précédé par un X, ce qui indique que la substance réagit dangereusement au contact de l'eau, interdisant ainsi son usage en milieu humide. En cas d'accident, cette indication impose une vigilance accrue des secours en cas d'ambiance humide ou de pluie.

Le code ONU ainsi que le code danger doivent être apposés à l'avant et à l'arrière des véhicules transportant des matières dangereuses (TMD). Le déchiffrement du code danger est présenté dans le tableau I.5.

Tableau I.5 Déchiffrement du numéro de code danger [22].

	Premier chiffre Danger principal	Deuxième et troisième chiffres
0		La matière ne comporte pas de danger secondaire
1	Matière explosive	
2	Gaz comprimé	Risque de fuite de gaz
3	Liquide inflammable	Inflammable
4	Solide inflammable	
5	Matière comburante ou peroxyde	Comburant
6	Matière toxique	Toxique
7	Matière radioactive	
8	Matière corrosive	Corrosive
9	Danger de réaction spontanée ou violente	Danger de réaction spontanée ou violente
X	Réaction dangereuse au contact de l'eau	Réaction dangereuse au contact de l'eau

Chaque véhicule doit être muni d'une signalisation générale TMD :

- Les plaques de signalisation doivent être rectangulaires, de dimensions 40 cm sur 30 cm, de couleur orange, et placées à l'avant, à l'arrière, ou sur les côtés du véhicule concerné. Les figures I.1 et I.2 illustrent les pictogrammes de signalisation correspondants.
- 

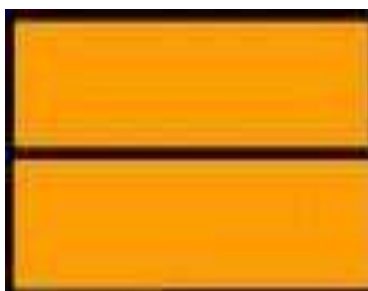


Figure I.1 Pictogramme de signalisation de TMD vierge [22]

- Ou bien par une plaque rectangulaire orange réfléchissante comportant le code danger et le code matière. Cette plaque permet d'identifier rapidement les dangers associés à la substance transportée. Le numéro d'identification est utilisé notamment pour le transport en vrac solide ou en citerne.

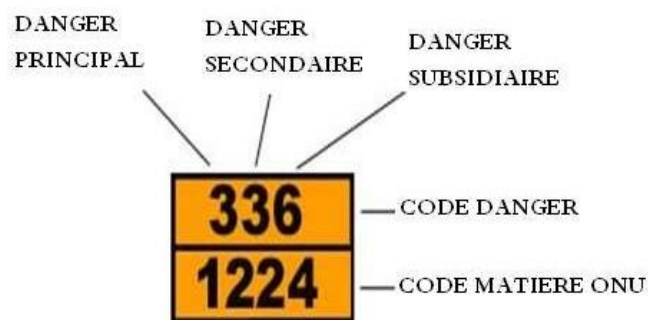


Figure I.2 Pictogramme de signalisation de TMD.

En complément de ce qui a été mentionné précédemment, des pictogrammes supplémentaires (voir tableau I.3) sont également apposés sur les côtés et à l'arrière du convoi. Ces pictogrammes jouent un rôle essentiel pour identifier les caractéristiques des matières transportées et permettent de prendre les mesures et équipements adaptés en cas d'intervention. Ils constituent un élément crucial pour limiter les dommages lors d'un accident nécessitant une action rapide. Il est important de souligner que les personnes et les secours doivent redoubler de vigilance en cas de pluie ou d'humidité ambiante. Un exemple de signalisation sur un camion-citerne est présenté dans les figures I.3 et I.4.

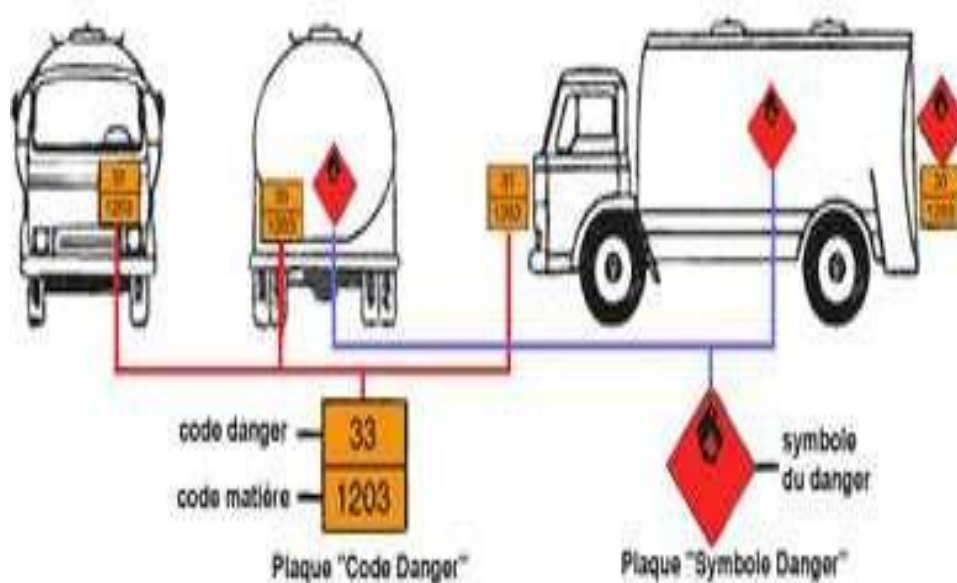


Figure I.3 Exemple de signalisation d'un camion-citerne transportant des carburants [25].

Une seule matière dans une citerne multi cuves ou mono cuve.

- plaque "**code danger**" à l'arrière et à l'avant du véhicule.
- plaque "**symbole danger**" à l'arrière et sur les côtés de la citerne.

Le transporteur doit apposer sur son véhicule des plaques signalétiques illustrant les symboles des dangers majeurs lorsque la quantité transportée nécessite l'affichage du code matière et du code danger du produit. Cette opération est appelée « placardage ».

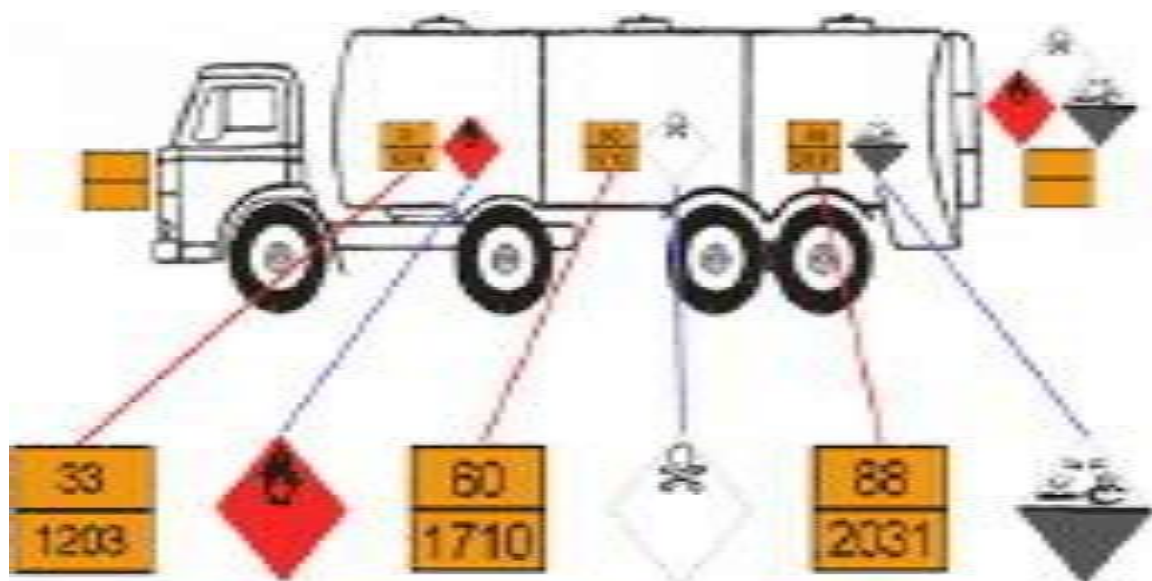


Figure I.4 Exemple de signalisation d'un camion-citerne à compartiment [25].

Plusieurs matières différentes présentent des dangers variés :

- plaque "**code danger**" vierge à l'arrière et à l'avant,
- plaque "**code danger**" sur la citerne contenant la matière,
- plaques "**symbole danger**" sur la cuve contenant le produit et à l'arrière.

Une étiquette de danger, matérialisée par un losange reprenant le symbole du danger principal du produit, doit être apposée sur l'emballage lorsque le transport se fait en colis. Les figures I.5 et I.6 illustrent respectivement la signalisation des colis et bouteilles de gaz, ainsi que celle d'un camion-citerne.

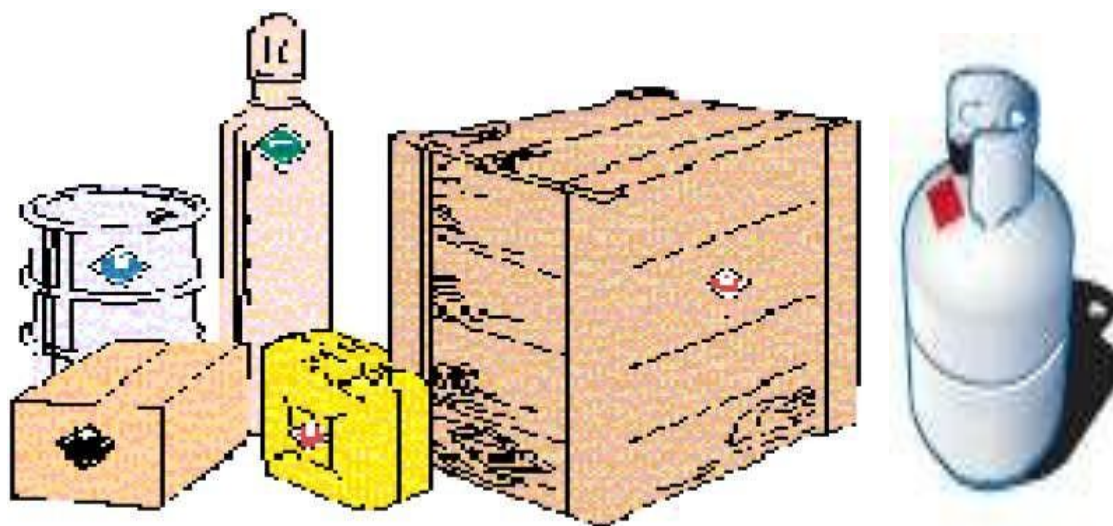


Figure I.5 Signalisation des colis et bouteilles de gaz [25].

### Les camions non citernes :

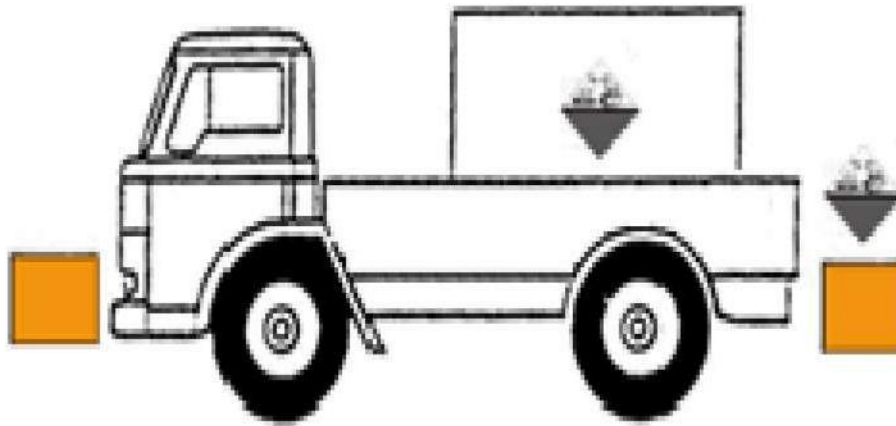


Figure I.6 Signalisation des camions non citerne. [25].

- Plaques « **code danger** » vierges, sans liseré, placées à l'avant et à l'arrière du véhicule.
- Plaques « **symbole danger** » apposées sur les côtés et à l'arrière.

NB : La plaque orange doit être enlevée ou barrée lorsqu'aucune matière dangereuse n'est transportée.

#### 5.4. Le rôle de la signalisation dans un accident

Lors d'un accident, les services de secours doivent connaître la nature et les dangers des substances transportées. La signalisation leur permet d'identifier les produits à distance et d'intervenir de manière adaptée et sécurisée. La maîtrise des numéros ou codes d'identification est essentielle dans ce contexte.

#### I.5.5. La formation du personnel

L'article 18 du décret exécutif n° 03-452 énonce une exigence légale concernant les chauffeurs de véhicules transportant des produits dangereux. Il précise que ces conducteurs doivent détenir un brevet professionnel délivré conformément à la réglementation en vigueur, attestant qu'ils ont suivi une formation spécifique à ce sujet.

#### I.5.6. Documents d'expédition

L'article 19 du décret exécutif n° 03-452 stipule que les conducteurs de véhicules transportant des produits dangereux doivent présenter aux autorités toutes les pièces relatives au véhicule prescrites par la loi et la réglementation en vigueur, notamment celles indiquant le type, la classe et le poids des matières transportées.

#### I.5.7. Le chargement des citernes

Pour éviter une surpression due à l'évaporation du produit dangereux, les citernes doivent être remplies à 80 % de leur volume total.

#### I.5.8. Équipement de sécurité

##### Extincteurs

Tout moyen de transport de matières dangereuses doit être équipé de deux extincteurs

portatifs :

- Un des extincteurs doit avoir une capacité minimale de 2 kg de poudre et être adapté à la lutte contre un incendie pouvant survenir dans la cabine de conduite ou le compartiment moteur.
- Un second extincteur, d'une capacité minimale de 6 kg de poudre, doit être prévu pour faire face à un feu de freins, de pneumatiques ou à un incendie impliquant le chargement.

Ces extincteurs doivent être munis d'un plombage permettant de vérifier s'ils ont été utilisés, contenir un agent d'extinction compatible avec la matière transportée, et porter l'indication de la date de leur prochaine inspection périodique par l'autorité compétente.

### **I.5.9. La circulation**

D'après l'article 21 du décret exécutif n° 03-452, le transport routier de marchandises dangereuses doit se conformer aux exigences de la loi n° 01-14 du 29 Joumada El Oula 1422 (correspondant au 19 août 2001), ainsi qu'aux dispositions spécifiques en vigueur relatives à l'acheminement de chaque type de produit dangereux :

- la compétence des conducteurs dans la gestion des convoyeurs.
- la circulation et la vitesse de conduite.
- l'escorte.
- la configuration des convois.
- l'origine, le lieu de chargement, l'itinéraire, la destination des substances.
- La surveillance et les conditions de stationnement.
- La présence et la conformité des équipements sensibles.
- Les horaires de circulation.

**Limitations de vitesse** : Le code de la route impose des limitations de vitesse spécifiques en fonction du poids maximal autorisé de la matière transportée et du système de freinage du véhicule concerné. Cette vitesse peut être réduite par décret préfectoral, en particulier pour les véhicules transportant des produits explosifs, inflammables ou susceptibles de polluer les eaux.

Selon l'article 23 de la loi n° 01-14 du 29 Joumada El Oula 1422 (correspondant au 19 août 2001), tout conducteur est tenu d'adapter la vitesse de son véhicule aux conditions de circulation, aux obstacles éventuels, aux difficultés de la route, aux conditions météorologiques ainsi qu'à l'état de la chaussée. Il doit faire preuve de prudence et conserver à tout moment la maîtrise de la vitesse de son véhicule.

**Interdictions d'accès** : Le stationnement et la circulation des véhicules transportant des produits dangereux sont soumis à une réglementation plus stricte que celle applicable aux poids lourds conventionnels. Certains ouvrages, comme les tunnels, font l'objet de restrictions particulières, voire d'interdictions de circulation pour les transports de matières dangereuses (TMD). Dans de nombreuses grandes agglomérations, des itinéraires sont spécifiquement

interdits ou, au contraire, recommandés pour ces véhicules afin de limiter les risques. La signalisation correspondante, telle que prévue par le code de la route, est illustrée à la figure I.7.

Sur certaines routes, le transport de produits dangereux est interdit. Cette interdiction est signalée par l'un des trois panneaux suivants :



Figure I.7 Signalisation du code de la route [22]

#### I.5.10. L'organisation des secours

Selon l'article 22 du décret exécutif n° 03-452, le plan de secours est mis en œuvre en tenant compte de l'ampleur géographique des conséquences causées par les risques liés au transport de produits dangereux ainsi que de leur degré de gravité, en conformité avec les stratégies d'action d'urgence établies par les articles 27 et 28 du décret n° 85-231 du 25 août 1985.

Le ministre responsable des transports à l'autorité d'établir, en cas de nécessité, des limitations concernant les horaires et les itinéraires de circulation.

Les articles 27 et 28 du décret n° 85-231 du 25 août 1985, susvisé, précisent que le wali, assisté des responsables des modules d'intervention concernés, des représentants du comité de sûreté ainsi que des membres du bureau de coordination et de protection de la wilaya, est chargé d'assurer le commandement et la coordination des opérations du plan de gestion des interventions et secours de la wilaya concernée.

En cas d'indisponibilité du wali, un intérimaire le supplée jusqu'à la nomination d'un nouveau responsable.

Article 28 – L'assemblée populaire communale, assistée des responsables des services de secours et de sécurité, des unités d'intervention concernées ainsi que des responsables de l'administration communale, est chargée de commander la gestion des opérations du plan d'organisation des secours et interventions de la commune.

En cas d'absence ou d'empêchement du responsable de la commune, un intérimaire le remplace jusqu'à la désignation d'un nouveau responsable.

En complément de ce qui a été précédemment exposé, l'article 29 précise que le centre opérationnel du plan d'intervention, de gestion et de secours de la commune ou de la wilaya est l'instance exclusive chargée de la conduite des opérations. À ce titre, il assure :

- L'évaluation de la gravité de l'accident.
- L'estimation des mesures nécessaires pour déclencher le plan, qu'il soit partiel ou total.
- La satisfaction des besoins essentiels sur le terrain.
- La gestion et la planification des interventions de sauvetage et de secours.
- La mobilisation des renforts.
- La transmission efficace de l'information.
- La protection des biens et des personnes.
- L'organisation du relogement des populations sinistrées.
- La mise en place de tous dispositifs supplémentaires requis.

#### **I.6. Les écarts dans la réglementation nationale par rapport à l'ADR**

Le retour d'expérience joue un rôle essentiel dans l'amélioration continue des réglementations nationales et internationales. Toutefois, en confrontant la réalité du terrain aux normes en vigueur ainsi qu'aux exigences de l'ADR, plusieurs écarts notables apparaissent, notamment :

- Absence d'articles spécifiques concernant les équipements de protection individuelle obligatoires, tels qu'une paire de gants de protection, un liquide de rinçage pour les yeux, un dispositif de protection oculaire (lunettes de sécurité), une protection pour les égouts, un masque d'évacuation d'urgence pour chaque membre de l'équipage du véhicule, ainsi qu'un réservoir collecteur en plastique.
- Absence de réglementation précise définissant les horaires de circulation et les itinéraires obligatoires pour le transport routier de matières dangereuses.
- La formation délivrée habilite à conduire un véhicule de transport routier de matières dangereuses (VTRMD), mais elle ne suffit pas à assurer une véritable prévention ou sensibilisation efficace contre les risques d'accidents.
- Absence de communication efficace entre les conducteurs privés (tiers) et les services de la NAFTAL. En effet, bien que les agents de la NAFTAL contrôlent l'état des véhicules avant le chargement, les conducteurs, qui sont pourtant les acteurs principaux du système de TRMD, ne disposent pas du droit ni des moyens de procéder eux-mêmes à cette vérification.

#### **I.7. Risques associer au TMD**

Les matières dangereuses transportées peuvent provoquer plusieurs risques lors d'un accident, quelle que soit la modalité de transport utilisée ferroviaire, fluviale, aérienne ou routière. Parmi les risques susceptibles d'être engendrés, on trouve notamment :

- **Le risque d'explosivité** : représente la possibilité qu'une explosion survienne dans un environnement donné. Une explosion se produit lorsque de l'énergie est libérée de

manière soudaine et violente, entraînant une augmentation rapide de la pression et de la température. Parmi les causes potentielles d'explosion, on compte la présence d'étincelles notamment dans les citernes de gaz inflammables, le mélange de diverses substances chimiques, le réchauffement d'une cuve contenant des produits volatils ou comprimés, ou encore l'activation imprévue de munitions ou d'artifices. L'existence d'un incendie ou la formation de mélanges particulièrement réactifs peut également déclencher une explosion, suivie de la rupture d'une enceinte, provoquant des effets thermiques, accompagnés d'effets mécaniques tels que la surpression et, par conséquent, une onde de choc. Les blessures résultant d'une explosion peuvent être graves, voire mortelles : asphyxie, brûlures, traumatismes dus aux projectiles et dommages internes causés par l'onde de choc. Ces lésions peuvent se manifester à proximité immédiate de l'accident, mais aussi jusqu'à plusieurs centaines de mètres, et sont souvent sévères. Cependant, il convient de noter que de tels accidents restent relativement rares.

- **Le risque d'incendie** : représente la possibilité qu'un feu se déclare dans une situation ou un environnement donné. Un incendie se produit lorsque des substances inflammables entrent en contact avec une source d'inflammation ou de chaleur. Dans le cadre du transport routier de matières dangereuses, un incendie peut survenir à la suite d'un choc contre un obstacle, de l'échauffement anormal d'un composant du véhicule, d'une explosion ou encore d'une inflammation accidentelle d'une fuite de produit à proximité du véhicule. Un incendie impliquant des matières gazeuses, inflammables, liquides ou solides peut entraîner des blessures telles que l'intoxication, l'asphyxie due à l'inhalation de fumées toxiques, ainsi que des brûlures thermiques. La gravité de ces blessures dépend notamment de la distance entre la source de l'incendie et les personnes ou les animaux exposés.
- **Le nuage toxique** : désigne la formation et la dispersion dans l'atmosphère d'un nuage contenant des substances chimiques toxiques. Ce risque survient généralement lors d'un déversement accidentel de produits toxiques ou à la suite de la combustion de produits, même non toxiques à l'état initial, pouvant générer des substances dangereuses pour la santé humaine et l'environnement. Ces substances peuvent être nocives par contact cutané, ingestion directe ou indirecte, ou surtout par inhalation. Elles pénètrent principalement dans l'organisme par les voies respiratoires, mais peuvent également affecter les yeux. Les symptômes liés à l'exposition varient de simples irritations de la peau ou sensations de picotements dans la gorge, à des lésions graves telles que des œdèmes pulmonaires ou une asphyxie, en fonction de la concentration de la substance et de la durée d'exposition. Ces effets peuvent se manifester à plusieurs kilomètres du site de l'incident, rendant ce type de risque particulièrement préoccupant.

Les risques précédemment énumérés (nuage toxique, incendie, explosion) peuvent se manifester simultanément lors d'un accident. Le transport de matières dangereuses constitue un risque mobile, exposant potentiellement l'ensemble du territoire. Cette vulnérabilité est particulièrement accrue dans les zones sensibles, telles que les zones industrielles chimiques et pétrolières, les abords des autoroutes, ainsi que sur les routes nationales et départementales où le trafic est important.

### I.7.1 Types d'accident

Il existe deux catégories d'accidents impliquant un véhicule transportant des produits dangereux [26] :

- **Accidents de catégorie "C"** (C comme "circulation") : Ce type d'accident se produit sans qu'il y ait de dégagement de la matière dangereuse transportée.
- **Accidents de catégorie "M"** (M comme "matière") : Ces accidents se caractérisent par :
  - Des dommages liés à la substance dangereuse (brûlures, intoxications, malaises, etc.).
  - Une libération de produit dangereux supérieure à 100 litres.
  - Une dispersion de gaz, quelle que soit la quantité.
  - Un incendie ou une explosion impliquant la cargaison ou une partie de celle-ci.

### I.7.2 Conséquences

Le résultat direct et indésirable d'un incident, notamment les impacts liés au rejet de matières dangereuses, dépend principalement des risques associés à la substance déversée, de l'ampleur de ce rejet ainsi que de la présence de récepteurs vulnérables, tels que les personnes, les écosystèmes et les biens matériels.

Les conséquences d'un accident impliquant des matières dangereuses englobent les enjeux suivants :

- **Les enjeux humains** : concernent les personnes exposées, directement ou indirectement, aux conséquences de l'accident, que ce soit dans des lieux publics, leur lieu de travail ou leur domicile. Les risques pour ces individus peuvent aller de blessures légères jusqu'au décès.
- **Les enjeux économiques** : portent sur les impacts financiers que peut engendrer un accident impliquant des marchandises dangereuses. Les entreprises situées à proximité du sinistre, ainsi que les infrastructures comme les routes et les voies ferrées, peuvent subir des dommages ou destructions, entraînant des pertes économiques importantes.
- **Les enjeux environnementaux** : un incident avec des marchandises dangereuses peut gravement affecter les écosystèmes, provoquant la destruction partielle ou totale de la flore et de la faune. De plus, les pollutions résultantes, notamment des nappes phréatiques, peuvent engendrer des conséquences sanitaires à moyen ou long terme pour la population.

### I.8. Conclusion

Le transport de produits chimiques et d'autres matières dangereuses par voies ferrées, routes, voies navigables, pipelines, ainsi que par d'autres modes et systèmes, constitue un pilier essentiel de l'économie et du niveau de vie actuel. Avec la mondialisation, les échanges transfrontaliers de matières premières, de produits manufacturés et de déchets dangereux ont connu une croissance sans précédent. Le volume du trafic et la rapidité des déplacements continuent d'augmenter, tant dans les pays développés que dans les pays en développement. Certains systèmes de transport fonctionnent désormais à pleine capacité, mettant ainsi sous pression les infrastructures, les réglementations et leur gestion.

Bien que l'Algérie n'ait pas ratifié l'ADR, elle dispose néanmoins d'un cadre réglementaire solide régissant le transport des matières dangereuses, initialement établi par le décret exécutif n° 90-79 issu de la loi n° 88-17 du 10 mai 1988. Ce cadre a été abrogé en 2003

par le décret exécutif n° 03-452, adopté suite à la loi n° 01-13 du 7 août 2001, sur recommandation du comité d'experts chargé du transport des marchandises dangereuses au sein du Conseil économique et social. Cette réforme a été motivée par les avancées techniques, l'apparition de nouvelles substances et matières, la nécessité d'un système de transport modernisé, et surtout l'impératif d'assurer la sécurité des personnes, des biens et de l'environnement. Les règlements types ont pour objectif de présenter un ensemble de dispositions de base, permettant l'élaboration uniforme des réglementations nationales relatives au transport routier, tout en offrant la flexibilité nécessaire pour s'adapter à des situations spécifiques. Ce texte réglementaire porte principalement sur la classification des produits dangereux, leur signalisation, la formation des conducteurs, les modalités de chargement, ainsi que sur les dispositifs de sécurité.

En effet, malgré les réglementations existantes, le transport routier des marchandises dangereuses demeure difficile à maîtriser et présente des risques importants, liés à divers facteurs tels que les conducteurs, la circulation et les conditions climatiques. Ces risques se manifestent principalement sous trois formes : l'explosion, l'incendie et la formation de nuages toxiques. La gravité de ces phénomènes dépend essentiellement de l'intensité de l'accident, de son emplacement, ainsi que du type et de la quantité de matière transportée. Les conséquences peuvent être sévères, affectant les êtres humains (personnes physiques), engendrant des pertes économiques (dommages matériels, infrastructures, etc.) et provoquant des impacts néfastes sur l'environnement (faune et flore).

Il est primordial d'analyser ces risques afin de pouvoir les identifier, les évaluer, les maîtriser, les gérer, les éviter, voire les réduire au minimum. Cette démarche est rendue possible grâce à l'émergence de diverses techniques de gestion des risques. Dans le deuxième chapitre, nous nous concentrerons sur la description de plusieurs méthodes de gestion des risques.

## **CHAPITRE II**

### ***Etat de l'art des méthodes d'analyse des risques***

## II.1. Introduction

Le développement incessant des industries pose plusieurs problèmes majeurs. Actuellement, elles sont confrontées à des défis significatifs, compromettant leur durabilité et mettant en péril la réalisation de leurs objectifs. Pour relever ce défi, les entreprises doivent adopter un plan efficace de gestion des risques et développer des techniques d'évaluation et d'analyse. Cela permet de garantir le fonctionnement sécurisé de leurs installations [27].

La maîtrise des risques consiste à détecter, évaluer et prioriser les risques afin de les minimiser, de les contrôler ou de les éliminer. Cette démarche comprend plusieurs étapes : l'identification des risques potentiels, l'analyse de leur probabilité et de leur impact, la mise en place de mesures de prévention et de contrôle, ainsi que le suivi et la réévaluation continus des risques [24].

Dans la littérature, l'analyse des risques est définie comme le processus d'identification et d'évaluation des dangers potentiels. L'appréciation des risques vise à déterminer l'acceptabilité de ces risques, en se fondant sur les informations disponibles et documentées.

Les approches d'évaluation des risques sont classées en deux groupes : quantitatives et qualitatives, en fonction des types de paramètres impliqués. Les approches quantitatives utilisent des données numériques et statistiques pour déterminer le niveau de risque, tandis que les méthodes qualitatives évaluent l'indice de risque grâce aux connaissances d'experts, en utilisant des données catégorielles, observationnelles et non numériques [23, 28].

Dans ce chapitre, nous commencerons par introduire quelques notions et définitions essentielles liées à la maîtrise des risques, en mettant particulièrement l'accent sur la gestion du risque. Nous présenterons ensuite la démarche de gestion des risques ainsi que ses principales classifications. Enfin, nous explorerons diverses approches d'analyse des risques, telles que l'arbre de défaillance, l'analyse multicritère de la décision et la logique floue, en décrivant brièvement leurs principes de fonctionnement.

## II.2. Concepts et définitions

Dans le but d'analyser les termes associés à l'analyse des risques, il est primordial de mettre en évidence quelques concepts essentiels inhérents à ce processus.

### II.2.1. Notion de danger

Le concept de « danger » est défini dans les directives IEC 61508 [27], CEI 60300-3-9 [28] et ISO/IEC Guide 51 [29], publiées respectivement en 2010, 1995 et 2014, comme étant « une source potentielle de dommage ou une nuisance pouvant causer des dommages ». Par ailleurs, la norme OHSAS 18001 [30], introduite en 1999, définit également le danger en se fondant sur le concept de « dommage », comme une situation ou une source susceptible de provoquer une atteinte à la santé ou des blessures, des dommages environnementaux ou matériels, ou encore une combinaison de ces effets.

Dans ce contexte, le terme « source » peut être défini de différentes manières et prêter à certaines ambiguïtés. Il peut désigner une faute, une défaillance ou une erreur, notamment dans l'interférentiel proposé par Laprie et al. [31–32]. Dans le secteur industriel, il peut également désigner une situation physique inappropriée ou une propriété intrinsèque d'une substance dangereuse [33].

En se référant à Guiochet [32], la définition d'un danger nécessite de prendre en compte les conditions environnementales ainsi que l'état du système, en particulier dans le cas des systèmes automatisés. Cette approche nous conduit directement à la définition du danger dans

les systèmes informatiques, proposée par Leveson [34]. Selon cette auteure, le danger (hazard, en anglais) peut être défini comme « un état ou un ensemble de conditions d'un système (ou d'un objet) qui, combiné à certaines conditions environnementales, mènera inévitablement à un accident ».

Dans le contexte de l'industrie chimique et de ses procédés, le danger est défini comme « la combinaison d'un environnement d'exploitation, d'une substance dangereuse et de certains événements imprévus pouvant engendrer un accident » [35].

Il est important de noter que, malgré la diversité des définitions du danger mentionnées ci-dessus, celles-ci convergent vers une même signification.

### II.2.2. Notion du risque

Selon le référentiel ISO/IEC Guide 51 [29], le risque est défini comme « la combinaison de la probabilité de l'occurrence d'un dommage et de ses effets ou conséquences ». Ces effets ou conséquences incluent toute atteinte à la santé humaine, des blessures physiques, ainsi que des dommages à l'environnement ou aux biens matériels.

La probabilité d'occurrence désigne la fréquence ou la chance qu'un événement ou une séquence d'événements se produise au cours d'un intervalle de temps donné. En d'autres termes, elle correspond à la mesure de la possibilité qu'un événement survienne dans un contexte donné. La gravité, quant à elle, se définit comme le résultat direct et indésirable d'un incident [36].

En outre, le risque dans le contexte industriel est défini comme un accident susceptible de se produire sur un site industriel lors des activités de production, pouvant entraîner des dommages ou des pertes directes et graves pour les communautés avoisinantes, l'environnement et les biens. En principe, les risques industriels peuvent être classés en deux catégories, selon la gravité des conséquences qu'ils peuvent engendrer :

- **Les risques professionnels** : correspondent aux dangers auxquels sont exposés les travailleurs dans l'exercice de leur emploi, susceptibles d'entraîner des problèmes de santé liés au travail, des accidents du travail ou des maladies professionnelles. Ces risques sont généralement classés en plusieurs catégories, telles que les risques mécaniques, électriques, chimiques, biologiques, physiques, ergonomiques ou psychosociaux, selon leur nature et leurs effets potentiels sur la santé et la sécurité des travailleurs.
- **Risques industriels majeurs** : selon leur nature, se divisent en trois principaux types :
  - **Le risque d'incendie** : souvent appelé « risque thermique », survient lorsque trois facteurs se combinent simultanément : le comburant, le combustible et la source de chaleur. En effet, lorsque le feu atteint des réserves chimiques, il peut provoquer la formation de nuages toxiques, nuisibles à l'environnement et à la santé humaine.
  - **Le risque d'explosion** : se caractérise par une évolution rapide d'un système, entraînant la formation d'ondes de choc et une libération soudaine d'énergie. Ce phénomène peut causer des dommages au corps humain et compromettre la stabilité des structures matérielles. De plus, des substances toxiques peuvent être libérées et dispersées dans l'atmosphère.
  - **Le risque de toxicité** : correspond à la dispersion de matières dangereuses dans l'atmosphère, le sol ou l'eau, telles que des préparations chimiques ou substances diverses. Ces produits peuvent être cancérigènes, corrosifs, mutagènes, explosifs, inflammables ou toxiques pour la reproduction, entre

autres. Ils peuvent entraîner, d'une part, des incidents graves comme des explosions, des brûlures, des intoxications, voire des maladies professionnelles telles que des cancers ou des allergies. D'autre part, ils sont susceptibles de polluer l'environnement à travers des émissions diffuses ou des déversements accidentels.

### II.2.3. Notion de criticité / Grille de criticité

Cette terminologie désigne le résultat obtenu en prenant en compte la probabilité d'occurrence et la gravité d'un événement. Elle permet de prédire le niveau de risque, qui peut être classé et ajusté en fonction de l'importance relative de ces deux dimensions à l'aide d'une grille appelée « grille de criticité ». Cette grille aide à apprécier le niveau de risque et à déterminer s'il est tolérable ou intolérable, ce qui est essentiel pour évaluer le niveau de confiance dans un système. Un risque tolérable (ou acceptable) doit être considéré dans un contexte donné et repose sur les valeurs sociales et culturelles propres à la société concernée. L'acceptabilité du risque est évaluée à travers un ensemble de paramètres qui peuvent être quantitatifs ou qualitatifs [37, 38].

Les critères d'acceptation des risques constituent une référence fondamentale pour évaluer la classe globale de risque. À l'issue de cette évaluation, la pertinence des mesures nécessaires à la gestion du risque est examinée, ces mesures devant être définies préalablement. Par ailleurs, ces critères doivent refléter les spécificités de l'activité ainsi que les objectifs de sécurité fixés.

Ces critères sont définis en s'appuyant sur l'expérience, les exigences réglementaires, les normes applicables ainsi que les connaissances théoriques [38–39].

### II.2.4. Notion de sécurité

La sécurité est devenue une préoccupation majeure dans de nombreux secteurs technologiques. Elle est définie de différentes manières, mais désigne souvent « l'absence de conditions susceptibles de provoquer des pertes ou des dommages [39] ».

De manière similaire à la disponibilité et à la fiabilité dans divers référentiels, la sécurité est également définie comme suit : « La sécurité est l'aptitude d'un système à fonctionner ou à dysfonctionner sans provoquer un événement redouté, tant pour son environnement que pour lui-même, notamment sur le plan humain [40, 41] ».

La sécurité permet également de déterminer le niveau de confiance accordé aux systèmes et installations en fonction des risques encourus. Elle doit en effet prendre en compte l'ensemble des populations potentiellement affectées, qu'elles soient matérielles, humaines ou fonctionnelles. Par conséquent, la sécurité industrielle englobe différents aspects :

- La sécurité individuelle (travailleurs et les humains).
- La sécurité des installations industrielles (électriques, mécaniques, informatiques, chimiques, etc.).
- La sécurité des équipements (machines industrielles et appareils).
- La sécurité des réseaux de communication ...etc.

L'objectif principal est de réduire au maximum la gravité des risques liés aux activités de l'entreprise, tant sur les plans social, environnemental qu'économique.

### II.3. Processus de gestion des risques

La gestion des risques aide les responsables et les parties prenantes chargées de la prise de décision à comprendre les risques susceptibles d'affecter la réalisation des objectifs, ainsi que la cohérence et l'efficacité des mesures de contrôle existantes. Elle sert de base pour choisir la méthode la plus appropriée afin d'estimer ces risques. Les résultats de l'appréciation des risques constituent une contribution essentielle aux processus décisionnels.

La gestion des risques constitue l'ensemble du processus d'identification, de diagnostic et d'estimation des risques (voir figure II.1) [42]. La manière dont ce processus est appliqué dépend à la fois du contexte spécifique de la gestion des risques et des techniques et méthodes adoptées pour l'appréciation des risques.

La gestion des risques nécessite souvent une approche pluridisciplinaire, car les risques peuvent englober une vaste gamme de causes et de conséquences.

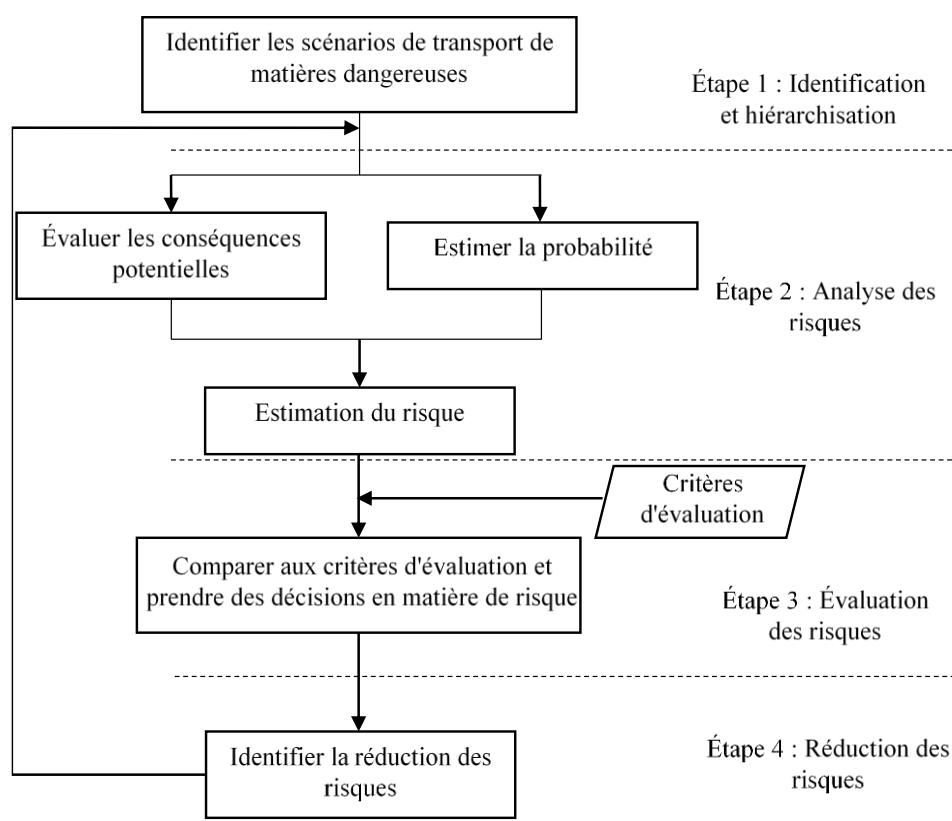


Figure II.1 Les étapes de la gestion des risques.

#### II.3.1. Identification des risques

L'identification des risques correspond au repérage, à la reconnaissance et à la documentation des risques.

L'objectif du repérage des risques est de déterminer ce qui pourrait se produire, ainsi que les situations susceptibles d'affecter l'accomplissement des objectifs du système ou de l'organisation. Une fois le risque identifié, l'organisation doit inventorier les mécanismes existants, notamment les personnes, les éléments de conception, les procédures et les systèmes en place.

La démarche d'identification des risques inclut le repérage des causes et des sources du risque (notamment les dangers dans le cadre d'un préjudice physique), des incidents, des contextes ou des conditions pouvant avoir un effet tangible sur les objectifs, ainsi que la détermination de la nature de cet impact. Les approches de reconnaissance des risques peuvent inclure :

- Les techniques fondées sur des données probantes, telles que les check-lists et l'analyse des données historiques.
- Les méthodes systématiques en groupe, où un groupe d'experts suit une démarche structurée pour identifier les risques à l'aide d'un ensemble organisé d'instructions ou de questions.
- Les techniques inductives de raisonnement, telles que la méthode HAZOP.

Diverses méthodes de soutien peuvent être employées pour améliorer la précision et l'exhaustivité de l'identification des risques, notamment le brainstorming et la méthode Delphi.

Indépendamment des techniques utilisées, il est essentiel de prendre en compte les facteurs humains et organisationnels lors de l'identification des risques. Par conséquent, les écarts entre ces facteurs et les prévisions doivent être intégrés au processus d'identification des risques, au même titre que les événements « matériels » ou « logiciels ».

### **II.3.2. Analyse du risque**

L'analyse des risques consiste à développer une compréhension approfondie du risque. Elle contribue à la gestion des risques en permettant de prendre, de manière adéquate, des décisions sur l'importance de gérer ces risques ainsi que sur les approches et techniques d'évaluation les plus appropriées.

L'analyse des risques a pour objectif de prédire les probabilités ainsi que les conséquences associées aux événements identifiés, en tenant compte de l'existence et de la performance des mesures de contrôle disponibles. Les conséquences et leurs probabilités sont ensuite combinées afin de calculer la valeur du risque.

L'analyse des risques inclut l'examen des sources et des causes de danger, de leurs effets, ainsi que de la probabilité que ces conséquences se produisent. Les facteurs influençant l'impact et la probabilité d'occurrence doivent être identifiés. Un événement peut avoir des répercussions multiples et affecter différents objectifs. Les mesures de contrôle des risques existantes et leur efficacité doivent également être prises en compte. Plusieurs techniques peuvent être nécessaires pour les applications complexes [43].

L'analyse des risques implique généralement une évaluation de l'ensemble des incidences possibles pouvant découler d'un événement, d'un contexte ou d'une condition, ainsi que de leurs probabilités respectives, afin de déterminer le niveau de risque. Toutefois, dans certaines situations — par exemple lorsque les conséquences sont susceptibles d'être insignifiantes ou que la probabilité est extrêmement faible — une estimation d'un seul facteur peut suffire pour prendre une décision.

Dans certains cas, une répercussion peut résulter d'une série de facteurs ou de circonstances différents, ou lorsque les événements spécifiques ne sont pas clairement déterminés. Dans ce contexte, la gestion des risques se concentre sur l'évaluation de la valeur et de la vulnérabilité des éléments du système afin de déterminer les mesures adaptées en termes de degrés de protection ou de plans de récupération.

Les approches utilisées pour le traitement des risques peuvent être quantitatives, semi-quantitatives ou qualitatives. Le niveau de précision requis varie en fonction de l'application spécifique, de la qualité et de la disponibilité des données, ainsi que des exigences de l'organisation en matière de prise de décision. Certaines techniques, ainsi que le niveau de précision de l'analyse, peuvent être prescrits par la législation.

Dans les cas où l'analyse est qualitative, il est essentiel d'expliquer clairement tous les termes employés et de documenter les bases de tous les paramètres utilisés.

Même après qu'une quantification complète ait été réalisée, il est important de reconnaître que les niveaux de risque estimés restent des prédictions. Il convient de ne pas leur attribuer un degré de précision supérieur à celui permis par la qualité des données et les méthodes utilisées.

Les niveaux de risque doivent être exprimés de la manière la plus appropriée pour le type de risque concerné, et sous une forme qui facilite son appréciation. Dans certaines situations, l'ampleur d'un risque est représentée par une distribution de probabilités couvrant un ensemble de conséquences possibles.

La démarche d'analyse des risques peut couvrir plusieurs aspects, notamment :

- Évaluation des mesures de contrôle.
- Analyse des conséquences.
- Analyse de la vraisemblance et estimation des probabilités.
- Analyse préliminaire des risques (APR).
- Étude des incertitudes et des sensibilités.

### **II.3.3. Évaluation du risque**

L'évaluation des risques consiste à comparer les niveaux de risque estimés aux critères de risque définis lors de l'établissement du contexte, afin de déterminer la gravité et la nature des risques, ainsi que leur acceptabilité.

L'évaluation des risques s'appuie sur la compréhension acquise lors de l'analyse des risques pour orienter les décisions concernant les mesures à prendre. Des aspects juridiques, éthiques, financiers, ainsi que d'autres considérations y compris la perception du risque sont également pris en compte dans la mise en œuvre des actions.

Les mesures peuvent porter sur les points suivants :

- Déterminer si un risque nécessite un traitement.
- Établir les priorités de traitement.
- Décider si une activité doit être entreprise ou non.
- Choisir la voie à suivre parmi plusieurs options possibles.

La nature des mesures à adopter et les paramètres à utiliser pour prendre ces décisions ont été définis lors de l'établissement du contexte. Toutefois, ils doivent être réexaminés plus en détail à ce stade, maintenant que l'on dispose d'une meilleure compréhension des risques spécifiques identifiés.

Le cadre le plus simple pour définir les paramètres de risque repose sur un seuil unique permettant de distinguer les risques qui nécessitent un traitement de ceux qui n'en nécessitent pas. Bien que ce modèle produise des résultats simples et faciles à interpréter, il ne prend pas en compte les incertitudes liées à l'estimation des risques, ni à la définition précise du seuil entre les risques acceptables et ceux qui exigent une action.

La décision de traiter ou non un risque, ainsi que la manière de le faire, peut varier en fonction des avantages et des coûts associés à la prise de risque et à la mise en place de mesures d'atténuation.

Une méthode couramment utilisée consiste à classer les risques en trois catégories :

- Une fourchette supérieure : où le niveau de risque est jugé inacceptable, quels que soient les avantages que l'activité pourrait apporter. Dans ce cas, l'évaluation du risque est indispensable, quel qu'en soit le coût.
- Une fourchette intermédiaire (zone « grise ») : où les avantages et les coûts sont pris en compte, et où les mesures de réduction du risque sont mises en balance avec les conséquences potentielles.
- Une fourchette inférieure : où le niveau de risque est considéré comme négligeable ou suffisamment faible pour qu'aucune mesure de réduction ne soit nécessaire.

Le système de paramètres « aussi bas que raisonnablement possible » (ALARP), utilisé dans les applications de sûreté, suit cette approche. Dans la zone médiane, il existe un seuil variable pour les risques négligeables, où les coûts et les bénéfices peuvent être directement comparés. En revanche, pour les risques élevés, l'ampleur des dommages doit être réduite autant que possible, jusqu'à ce que le coût d'une mitigation supplémentaire devienne complètement disproportionné par rapport à l'avantage obtenu en matière de sûreté.

### II.3.3. Acceptation du risque

L'acceptation des risques constitue une étape intermédiaire entre l'évaluation des risques et leur réduction. Elle revient aux experts chargés de juger de l'acceptabilité des risques, sur la base de deux facteurs principaux. Tout d'abord, le degré de risque calculé est positionné dans une matrice d'appréciation, qui repose sur des critères d'acceptabilité prédéfinis. À l'issue de cette évaluation, le risque peut être jugé acceptable ou non [43]. Si le risque est considéré comme tolérable, la démarche de gestion des risques s'arrête à cette étape. Dans le cas contraire, la réduction du risque doit être engagée.

### II.3.4. Réduction du risque

À ce stade, plusieurs précautions ainsi que des barrières de protection et de prévention sont mises en place pour minimiser la gravité du phénomène. Cela peut se traduire par une réduction potentielle des dangers, une atténuation des conséquences, ainsi qu'une diminution de la probabilité de survenue grâce à l'élaboration de mesures préventives visant à éviter les incidents. Outre les progrès réalisés en matière de fiabilité des équipements et des technologies, la protection implique également une bonne compréhension des paramètres de risque associés aux personnes et à l'organisation. L'adoption des stratégies préventives repose sur une comparaison entre le coût des conséquences des risques et celui de leur mise en œuvre, tout en prenant en compte leur probabilité de survenue. Il est recommandé de suivre régulièrement l'évolution des risques dans le cadre de la gestion de risque afin de corriger les mesures prévues si nécessaire, ainsi que de vérifier et garantir l'efficacité des actions préventives adoptées [43].

## II.4. Classifications des méthodes d'analyse et d'évaluation des risques

Les techniques d'analyse de risque sont généralement classées en trois catégories principales (voir figure II.2) :

- Méthodes qualitatives
- Méthodes semi-quantitatives

- Méthodes quantitatives

Dans la gestion des risques, plusieurs techniques d'analyse existent. Certaines sont particulièrement adaptées aux études qualitatives, telles que l'analyse préliminaire des risques (APR) et la méthode HAZOP, tandis que d'autres sont employées pour la quantification des risques, comme l'analyse des couches de protection (LOPA) ou le graphe de risque étalonné. Dans les sections suivantes, nous détaillerons ces trois grandes catégories de méthodes, avant de présenter les techniques spécifiques utilisées dans le cadre de cette thèse.

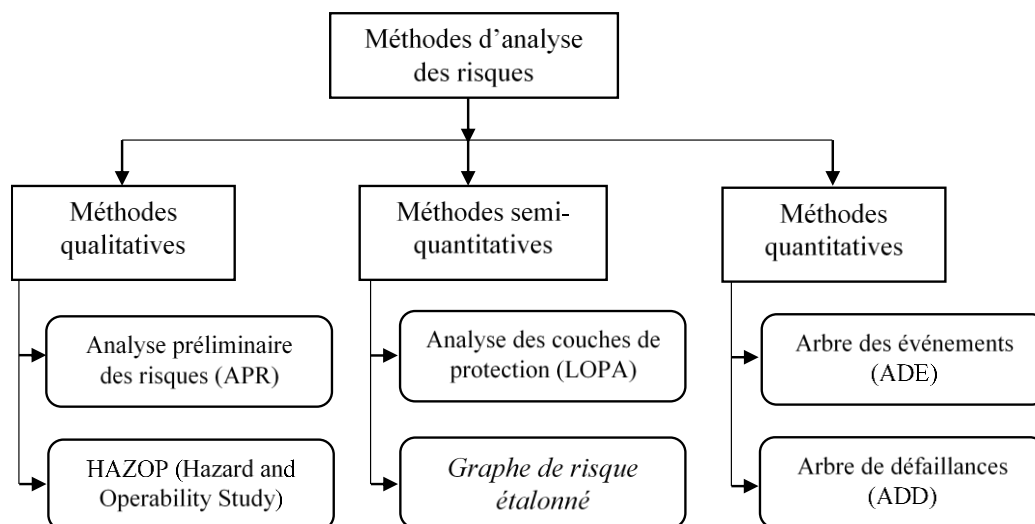


Figure II.2 Type de techniques d'analyse de risque.

#### II.4.1. Méthodes qualitatives

Les méthodes qualitatives d'évaluation des risques permettent d'identifier les éléments à analyser et de réaliser une appréciation simple et rapide. Dans ce cadre, une personne seule ou une équipe peut recueillir les informations nécessaires. Cette approche est souvent privilégiée lorsque les données chiffrées sont insuffisantes ou indisponibles, lorsque les ressources (budget ou expertise) sont limitées, ou encore lorsque le temps disponible est restreint [44, 45].

Comme pour toute évaluation des risques, la qualité repose d'abord sur la collecte rigoureuse des données relatives aux facteurs de risque, suivie d'une classification des risques selon leur acceptabilité, par exemple en catégories « acceptable » ou « inacceptable », ou encore selon une échelle « faible », « modéré » et « élevé ». Une fois les risques identifiés, les actifs présentant un risque élevé font l'objet de mesures d'atténuation prioritaires, tandis que les autres sont soumis à un examen plus approfondi via des méthodes semi-quantitatives ou quantitatives. Ces mesures reposent sur une hiérarchisation des activités et des risques associés [46, 49].

L'évaluation qualitative ne requiert pas la détermination explicite de la probabilité des événements, mais se concentre plutôt sur l'estimation des pertes potentielles. Dans ce cadre, plusieurs facteurs connexes sont pris en compte et analysés afin d'évaluer les risques.

- Les menaces : ce sont les éléments ou événements potentiels susceptibles de causer des dommages ou d'attaquer le système, tels que les incendies, les fraudes, ou autres risques. Elles sont omniprésentes dans tout système.
- Les vulnérabilités : ce sont les faiblesses ou les défauts du système qui le rendent plus exposé aux attaques ou aux dommages. Par exemple, la présence de matériaux inflammables constitue une vulnérabilité face au risque d'incendie.

- Les contrôles : ce sont les décisions et mesures mises en place pour atténuer les vulnérabilités et protéger le système contre les menaces. Ces contrôles peuvent prendre différentes formes, telles que des procédures, équipements, ou politiques de sécurité :
  - Les contrôles préventifs : ils visent à empêcher les attaques ou les défaillances avant qu'elles ne surviennent, réduisant ainsi leur impact potentiel.
  - Les contrôles correctifs : ils sont mis en place pour limiter les conséquences des attaques ou des défaillances une fois qu'elles se sont produites.
  - Les contrôles de détection : ils servent à identifier et signaler rapidement les attaques ou défaillances dès leur apparition, permettant ainsi de déclencher des actions préventives ou correctives.

Une fois identifiés, les risques peuvent être classés selon leur importance et leur probabilité d'occurrence, puis représentés au moyen d'une matrice. Un exemple de cette approche est présenté dans le tableau II.1, proposé par le General Accounting Office des États-Unis.

Tableau II.1. Matrice d'évaluation des risques [49,50]

Niveau de risque	Probabilité d'occurrence				
	Fréquent	Probable	Occasionnel	Lointain	Improbable
Niveau 1					
Niveau 2					
Niveau 3					
Niveau 4					

Dans ce modèle, les risques sont organisés selon deux critères principaux :

1. Par niveau de risque :

- a)- Les cases rouges indiquent un risque indésirable de niveau 1, nécessitant une action corrective immédiate.
- b)- Les cases orange représentent un risque indésirable de niveau 2, nécessitant une action corrective, mais laissant une certaine marge de manœuvre à la direction.
- c)- Les cases vertes illustrent un risque acceptable de niveau 3, soumis à examen par la direction.
- d)- Les cases blanches indiquent un risque négligeable de niveau 0, ne nécessitant pas de révision par la direction.

2. Par niveau de probabilité :

- a)- Fréquents : désigne une probabilité élevée d'incidents répétés, se produisant régulièrement ou quasi systématiquement.
- b)- Probable : implique une forte possibilité d'incidents isolés, susceptibles de survenir avec une fréquence notable mais non régulière.
- c)- Occasionnel : indique une possibilité d'occurrence ponctuelle, moins fréquente que pour les événements probables.
- d)- Lointain : décrit des événements peu susceptibles de se produire, avec une fréquence très rare ou négligeable.

e)- Improbable : qualifie des événements pratiquement impossibles, avec une probabilité extrêmement faible.

Les modèles qualitatifs d'évaluation des risques, bien qu'ils ne fournissent pas de résultats précis, sont souvent préférés par les professionnels. Ils sont plus accessibles et présentent plusieurs avantages, notamment une plus grande flexibilité dans la gestion de l'incertitude et de la subjectivité, ainsi que des exigences moindres en termes de temps pour leur mise en œuvre [51,52]. Cependant, l'évaluation purement qualitative des risques, bien que largement utilisée, peut s'avérer superficielle et trop générale. Elle conduit fréquemment à une conversion en données quantitatives afin d'exploiter pleinement les résultats obtenus [40-50].

#### II.4.2. Méthodes semi-quantitatives

Les méthodes semi-quantitatives sont utilisées pour décrire l'échelle des risques relatifs. Par exemple, un risque peut être classé dans des catégories telles que « faible », « moyen », « élevé » ou « très élevé ». Le nombre de niveaux de risque peut varier de 3 à 10, voire davantage. Dans cette approche, différentes échelles sont employées pour caractériser la probabilité d'occurrence d'événements indésirables ainsi que leurs conséquences. L'analyse des probabilités et des conséquences ne requiert pas de données mathématiques précises. L'objectif est d'établir une hiérarchie des risques basée sur une quantification reflétant l'ordre dans lequel ils doivent être traités, sans pour autant établir une relation strictement quantitative entre eux.

Nous présentons également un modèle d'évaluation des risques basé sur une méthode semi-quantitative, bien que le National Institute of Standards and Technology (NIST) l'ait initialement classé comme une méthode qualitative. À notre avis, l'utilisation de valeurs numériques pour estimer le risque, combinée à une interprétation qualitative des résultats, permet de ranger ce modèle dans la catégorie semi-quantitative. Ce système prend la forme d'une matrice qui croise la probabilité d'apparition des menaces et leur impact. Le niveau de risque est divisé en trois classes : élevé, moyen et faible. Dans l'exemple suivant (tableau II.2), la probabilité d'apparition des menaces est évaluée sur une échelle de 0,1 à 1 (0,1 faible, 0,5 moyen, 1,0 élevé), tandis que l'impact est mesuré sur une échelle de 1 à 10 (1 faible, 5 moyen, 10 élevé) [53,56].

Table II.2. Matrice d'évaluation des risques

Probabilité de la menace	Impact		
	Faible (1)	Moyen (5)	Elevé (10)
Elevé (1)	Faible (1×1=1)	Moyen (1×5=5)	Elevé (1×10=10)
Moyen (0.5)	Faible (0.5×1=0.5)	Moyen (0.5×5=2.5)	Moyen (0.5×10=5)
Faible (0.1)	Faible (0.1×1=1)	Faible (0.1×5=0.5)	Faible (0.1×10=1)

Comme l'illustre le tableau II.3, le risque varie entre 0,1 et 10, reflétant ainsi le degré d'exposition du système aux vulnérabilités :

- Risque élevé (entre 5 et 10) : nécessite des mesures correctives à mettre en œuvre dans les plus brefs délais.
- Risque moyen (entre 1 et 5) : des mesures correctives sont nécessaires, accompagnées d'un plan d'intégration dans les activités courantes.

- Risque faible (moins de 1) : le décideur doit évaluer les mesures correctives restantes avant d'adopter ou d'accepter le risque.

Nous considérons qu'une évaluation semi-quantitative est particulièrement utile, surtout dans les situations complexes où la quantification précise du risque est difficile. En effet, l'interprétation purement qualitative demeure souvent trop subjective. La combinaison des deux approches permet de tirer parti des avantages spécifiques de chacune tout en atténuant leurs limites respectives. Par ailleurs, dans la pratique, les logiciels d'évaluation des risques appliquant des méthodes qualitatives intègrent fréquemment des éléments semi-quantitatifs, même si le résultat final reste une appréciation qualitative du risque [57,58].

Table II.3. Facteurs associés au risque inhérent [59,60]

Le nombre de risques inhérents spécifiques identifiés	Impact		
	Faible	Moyen	Elevé
0, 1, 2 Risques	0.1-1	1-5	5-10
3, 4 Risques	0.1-1	1-5	5-10
5, 6 Risques	0.1-1	1-5	5-10

### II.4.3. Méthodes quantitatives

Les techniques quantitatives visent à estimer des valeurs précises pour les conséquences et leurs probabilités, permettant ainsi de calculer un degré de risque exprimé dans des unités définies lors de l'établissement du contexte. Cependant, une analyse quantitative complète n'est pas toujours réalisable ni souhaitable, notamment en raison d'informations insuffisantes sur le système ou l'activité étudiée, de la prise en compte complexe des facteurs humains, ou encore du rapport coût/efficacité de l'effort analytique. Dans ces situations, un classement comparatif semi-quantitatif ou qualitatif, réalisé par des spécialistes expérimentés dans leur domaine, peut rester une approche efficace.

### II.5. Méthode d'analyse des risques

#### II.5.1. Arbre de défaillances (ADD)

La méthode d'analyse par arbre de défaillances (ADD), ou "Fault Tree Analysis" (FTA) en anglais, est historiquement la première technique développée pour initier une étude systématique des risques. Mise au point dans les années 1960 par la société américaine Bell Telephone, elle a été testée notamment pour l'évaluation des systèmes de tir du missile balistique intercontinental Minuteman.

La société Boeing a poursuivi le développement de la méthode d'analyse par arbre de défaillances (ADD) et a recours à des logiciels spécialisés pour en faciliter l'application. Ces outils sont particulièrement utiles pour représenter graphiquement les résultats sous forme d'arbres, réaliser des analyses quantitatives et calculer les probabilités associées [61].

Depuis les années 1970, la méthode d'analyse par arbre de défaillances (ADD) a gagné en popularité et s'est largement répandue. Elle est désormais utilisée dans de nombreux secteurs industriels, notamment dans l'industrie nucléaire, l'aérospatiale, ainsi que dans les domaines des logiciels et de la robotique [62].

Un arbre de défaillances est représenté sous la forme d'un diagramme arborescent qui illustre les facteurs de causalité et leurs relations logiques avec l'événement principal (événement indésirable). L'événement redouté, situé au sommet de l'arbre, correspond à

l'événement critique à éviter. Les facteurs de causalité, appelés événements de base, se trouvent à la base de l'arbre et peuvent représenter des dysfonctionnements des composants. Ces événements de base ne correspondent pas forcément à une défaillance pure d'un composant ; ils peuvent également inclure des dysfonctionnements dus à des conditions environnementales extrêmes ou à des erreurs humaines. Pour plus de détails sur l'analyse par arbre de défaillances (ADD), veuillez consulter les références [62-63].

#### **II.5.1.1. Principe de la méthode**

L'arbre de défaillances est une méthode d'identification et d'analyse des facteurs susceptibles de contribuer à un événement indésirable donné, tel qu'un dysfonctionnement ou un accident. Ces facteurs de causalité sont déterminés par raisonnement déductif et organisés de manière logique sous la forme d'un diagramme arborescent, qui illustre les liens entre ces causes et l'événement principal. L'analyse repose souvent sur des questions répétées du type : « Quelles sont les causes ayant conduit à la survenue de l'événement redouté ? » et « Comment cet événement s'est-il produit ? ». Une fois l'arbre construit, il sert à évaluer la probabilité de l'événement indésirable en combinant les probabilités des événements de base situés à la base de l'arbre.

#### **II.5.1.2. Objectifs**

Un arbre de défaillance peut être utilisé de manière qualitative pour identifier les causes potentielles et les chemins menant à l'événement principal, ou bien de manière quantitative afin d'estimer la probabilité de cet événement, en s'appuyant sur les probabilités associées aux incidents causaux.

L'arbre de défaillance est utilisé lors de la conception d'un système pour identifier les causes potentielles de dysfonctionnement, ce qui aide à choisir entre différentes options de conception. Pendant la phase d'exploitation, il permet de comprendre comment les incidents redoutés pourraient se concrétiser et de déterminer la priorité des différentes voies menant à l'événement principal. De plus, un arbre de défaillance peut être employé pour analyser un défaut survenu, en visualisant sous forme de diagramme comment les différents événements se sont combinés pour provoquer la défaillance.

#### **II.5.1.3. Les entrées**

Pour une analyse qualitative, il est nécessaire de bien comprendre le système ainsi que les causes potentielles de défaillance, et de maîtriser techniquement les modes par lesquels un incident peut survenir. La réalisation d'arbres détaillés facilite la compréhension approfondie de l'analyse.

Pour une étude quantitative, il faut disposer de données fiables sur les taux de défaillance ou les probabilités que chaque élément de base de l'arbre se trouve en état de dysfonctionnement.

#### **II.5.1.4. Déroulement de la méthode**

Les étapes d'élaboration d'un arbre de défaillance sont les suivantes :

- Détermination de l'événement principal à étudier : Cet événement peut correspondre à un défaut spécifique ou à un effet plus large lié à ce défaut. Lorsque l'analyse porte sur les conséquences, l'arbre peut inclure une section dédiée à l'atténuation de ce défaut.

- Identification des déclencheurs immédiats : En partant de l'événement principal, on recense les causes ou événements immédiats susceptibles de provoquer cet incident majeur.
- Analyse détaillée des modes de défaillance : Chaque cause identifiée est étudiée pour comprendre les mécanismes susceptibles d'entraîner la défaillance.
- Approfondissement progressif jusqu'au niveau des événements de base : L'investigation se poursuit à des niveaux de détail de plus en plus fins, jusqu'à ce qu'une analyse supplémentaire ne soit plus productive. Dans un système physique, cela correspond souvent au dysfonctionnement des composants élémentaires. Ces derniers, situés au bas de l'arbre, sont appelés événements de base.
- Quantification des probabilités : Une fois que des probabilités sont attribuées aux événements de base, il devient possible de calculer la probabilité de l'événement principal. Pour que cette quantification soit valide, il est nécessaire de démontrer que toutes les entrées de chaque porte logique sont à la fois suffisantes et nécessaires pour déclencher l'événement de sortie. Dans le cas contraire, l'arbre reste utile pour analyser les relations de causalité, mais n'est pas adapté au calcul probabiliste.

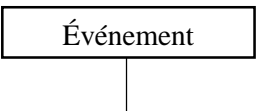
Dans le processus de quantification, il peut être nécessaire de simplifier l'arbre de défaillance en utilisant l'algèbre de Boole afin d'identifier les modes de défaillance redondants.

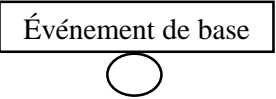
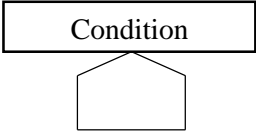
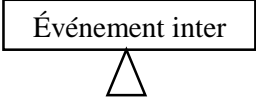
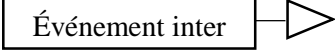


En plus de permettre le calcul de la probabilité de l'événement principal, cette simplification facilite également l'identification des ensembles de coupures minimales. Ces ensembles représentent des combinaisons élémentaires d'événements de base, chacune constituant un chemin unique menant à l'incident majeur. L'impact de ces ensembles sur l'événement principal peut alors être évalué pour mieux comprendre les points critiques du système.

Sauf dans le cas des arbres de défaillance simples, l'utilisation d'un logiciel spécialisé est indispensable pour effectuer correctement les calculs, en particulier lorsque des événements redondants apparaissent à plusieurs endroits de l'arbre. Ces outils permettent également de déterminer les ensembles de coupures minimales, garantissant ainsi la cohérence, la précision et la vérifiabilité des résultats.

La construction des arbres de défaillance est encadrée par plusieurs normes reconnues, notamment la norme IEC 61025 [64] et le document NUREG-0492 [65], ainsi que divers guides méthodologiques et publications de référence [66]. Pour réaliser un arbre de défaillance, une gamme d'éléments de base doit être considérée. Le tableau II.4 présente et décrit les principaux symboles et composants utilisés dans la construction d'un arbre de défaillances [62,66].

Table II.4. Les principaux éléments de l'ADD

Type de nœuds	Description	Représentation
<b>Événement-sommet ou événement intermédiaire</b>	L'événement intermédiaire résulte de la combinaison logique de plusieurs événements de base ou d'autres événements intermédiaires. Quant à l'événement sommet, il représente l'événement redouté situé au sommet de l'arbre, résultant de l'ensemble des combinaisons	

	possibles des événements contributifs situés en dessous.	
<b>Événement de base</b>	Cause basique ou défaillance d'un composant de base.	
<b>Événement de condition</b>	Il établit une condition nécessaire à la survenue de l'événement de la porte.	
<b>Événement de transfert</b>	Il pointe vers une branche de l'arbre et représente un sous-arbre utilisé ailleurs.	<p>Renvoi vers unsous-arbre</p>  <p>Sommet d'unsous arbre</p> 
<b>Événement de porte</b>	<p>Un opérateur logique est un connecteur qui définit la manière dont les événements de base contribuent à la survenue de l'événement redouté.</p> <p>Connecteur OU (OR) : il représente une logique binaire entre les entrées et la sortie de la porte. Cela signifie que la sortie (événement intermédiaire ou redouté) se produit dès que l'une des entrées se réalise.</p> <p>Connecteur ET (AND) : il établit une relation logique entre la sortie et l'ensemble des entrées de la porte. Contrairement au connecteur OU, la sortie ne se produit que si toutes les entrées sont réalisées simultanément.</p>	<p>Connecteur OU</p>  $P(A \text{ ou } B) = P(A) + P(B) - P(A) \times P(B)$ <p>Connecteur ET</p>  $P(A \text{ et } B) = P(A) \times P(B)$

### II.5.1.5. Sorties de la méthode

Les résultats de l'analyse de l'arbre de défaillance comprennent généralement :

- Une représentation graphique illustrant les différentes façons dont l'événement principal (ou redouté) peut se produire. Cette représentation met en évidence les chemins d'interaction où deux événements ou plus doivent se produire simultanément pour entraîner la défaillance.
- Une liste des ensembles de coupures minimales, représentant les chemins élémentaires menant à la défaillance. Lorsque les données sont disponibles, une estimation de la probabilité associée à chaque ensemble de coupures minimales peut être fournie.
- La probabilité de l'événement principal, correspondant à l'estimation quantitative de la probabilité que la défaillance se produise.

#### II.5.1.6. Avantages et limites de la méthode

Les points forts de l'ADD sont les suivants :

- Elle offre une méthode rigoureuse et structurée, tout en demeurant suffisamment flexible pour permettre l'analyse d'une grande variété de facteurs, incluant les phénomènes naturels et les interactions humaines.
- La démarche descendante propre à la méthode oriente l'analyse vers les conséquences des défauts directement liés à l'événement principal, ce qui permet de concentrer les efforts sur les scénarios critiques.
- L'ADD est particulièrement adaptée à l'analyse de systèmes complexes, dans lesquels de multiples interactions sont en jeu.
- La représentation graphique facilite la compréhension du fonctionnement du système ainsi que l'identification des facteurs de risque. Toutefois, lorsque les arbres deviennent très volumineux, leur manipulation peut nécessiter des outils informatiques spécialisés. Cette complexité permet néanmoins d'introduire des logiques plus avancées (comme les portes NAND ou NOR), bien que cela puisse compliquer la gestion de l'arbre.
- L'analyse logique des arbres et l'identification des ensembles de coupures minimales permettent de mettre en évidence les chemins de défaillance simples dans des systèmes très complexes, où certaines combinaisons spécifiques d'incidents pourraient autrement être négligées.

Les limites sont les suivantes :

- Les incertitudes associées aux probabilités des événements de base influencent directement la détermination de la probabilité de l'événement principal. Cela peut entraîner des niveaux d'incertitude très élevés lorsque les probabilités de défaillance des événements de niveau inférieur sont mal connues. Toutefois, une fiabilité acceptable est envisageable lorsque le système est bien compris et les données disponibles sont fiables.
- La complétude de l'arbre n'est pas toujours garantie, en particulier lorsque les éléments causaux ne sont pas clairement corrélés. Il peut alors être difficile de s'assurer que toutes les voies critiques menant à l'événement principal sont bien représentées. Par exemple, dans une analyse d'incendie, l'omission de certaines sources d'allumage peut rendre l'étude incomplète. Dans ce contexte, une évaluation probabiliste devient difficile, voire impossible.
- Le modèle de l'arbre de défaillance est statique : il ne prend pas en compte les interdépendances temporelles ou l'évolution des événements dans le temps.

- Les arbres de défaillance sont généralement limités à des états binaires (présence ou absence de défaillance), ce qui ne permet pas de représenter des niveaux de gravité ou des défaillances partielles.
- L'intégration de l'erreur humaine est partielle : bien qu'elle puisse être modélisée qualitativement, il est difficile d'y inclure des défaillances de type graduel ou de qualité, qui sont pourtant caractéristiques de nombreuses erreurs humaines.
- Les défaillances conditionnelles ou les effets domino (où une défaillance en entraîne d'autres) sont difficiles à modéliser efficacement dans un arbre de défaillance classique.

### **II.5.2.1 Analyse multicritère de la décision**

L'analyse multicritère de la décision, connue en anglais sous le nom de Multi-Criteria Decision Making (MCDM), a émergé dans les années 1950-1960 grâce aux travaux de Herbert A. Simon, qui a introduit le concept de "satisficing" et étudié les processus décisionnels dans un contexte d'information imparfaite. Dans les années 1970, le domaine s'est enrichi de nouvelles techniques, notamment : le Processus Analytique Hiérarchique (AHP) développé par Thomas L. Saaty et l'Approche de la Programmation par Objectifs, proposée par Abraham Charnes et William W. Cooper. Depuis, le MCDM s'est largement développé et connaît un succès croissant dans divers domaines, tels que la recherche opérationnelle, l'ingénierie, la gestion de l'environnement et les politiques publiques [67–69].

Les méthodes basées sur l'analyse décisionnelle multicritère fournissent des cadres permettant de structurer les problèmes de décision impliquant plusieurs critères, tout en proposant des techniques pour classer les alternatives selon leur priorité [70–71].

#### **II.5.2.1.1 Principe de l'approche**

L'objectif est d'utiliser une série de critères pour analyser de manière objective et transparente la valeur globale d'un ensemble d'options. En général, cette démarche vise à établir un ordre de préférence entre les alternatives existantes. L'étude nécessite la construction d'une matrice d'options ainsi que la définition de critères hiérarchisés et regroupés, afin de déterminer une note finale pour chaque option.

#### **II.5.2.1.2 Objectifs de l'approche**

Le MCDM est utilisé pour :

- Comparer plusieurs options dans une première phase afin d'identifier les alternatives privilégiées, envisageables ou inadéquates.
- Évaluer des choix en tenant compte de plusieurs critères, souvent contradictoires entre eux.
- Favoriser un consensus décisionnel lorsque différentes parties prenantes ont des objectifs ou des valeurs divergentes.

#### **II.5.2.1.3. Les entrees de l'approche**

Un ensemble d'options à analyser, avec des critères définis par des objectifs, utilisés de manière uniforme pour toutes les options afin de permettre leur différenciation.

#### **II.5.2.1.4. Déroulement de l'approche**

En général, un groupe de parties prenantes informées engage le processus suivant :

- définir le(s) objectif(s).

- déterminer les attributs qui se rapportent à chaque objectif.
- structurer les critères en une hiérarchie.
- élaborer des choix à traiter selon les attributs.
- déterminer le poids des critères et leur attribuer les pondérations correspondantes.
- évaluer les alternatives en fonction des critères. Cette évaluation peut être représentée sous la forme d'une matrice de notes.
- combiner plusieurs notes attribuées à un seul attribut en une seule note agrégée à plusieurs attributs.
- évaluer les résultats.

Il existe différentes méthodes pour déterminer le poids de chaque attribut, ainsi que plusieurs techniques pour agréger les notes des attributs en une seule note multi-attributs. Par exemple, les notes peuvent être combinées sous la forme d'une somme pondérée, d'un produit pondéré, ou en utilisant le Processus Analytique Hiérarchique (AHP), une technique d'élicitation des poids et des notes basée sur des comparaisons par paires. Toutes ces approches reposent sur l'hypothèse que la préférence pour un attribut est indépendante des valeurs des autres critères. Lorsque cette hypothèse ne tient pas, des modèles alternatifs doivent être employés.

Étant donné que les notes sont subjectives, l'analyse de sensibilité est utile pour évaluer dans quelle mesure les pondérations et les notes influencent les préférences globales entre les options.

#### **II.5.2.1.5 Les sorties de l'approche**

Les options sont présentées par ordre de préférence, de la meilleure à la moins bonne. Si le processus génère une matrice dont les axes correspondent aux attributs pondérés et aux notes attribuées à chaque choix, les options qui ne répondent pas aux critères les plus importants peuvent alors être éliminées.

#### **II.5.2.1.6 Les avantages et les inconvénients de l'approche**

Points forts :

- Fournit une approche simplifiée pour une prise de décision optimale, en exposant clairement les alternatives et les conclusions.
- Rend plus accessibles les problèmes décisionnels complexes qui ne se prêtent pas à une analyse coût/bénéfice classique.
- Aide à examiner de manière rationnelle des situations où des compromis sont nécessaires.
- Permet de trouver un compromis lorsque les parties prenantes ont des objectifs avec des attributs divergents.

Limite :

- Peut être affectée par des biais et une sélection inappropriée des critères de décision.
- La quasi-totalité des problèmes MCDM n'ont pas de solution unique ou pleinement concluante.
- Les méthodes d'agrégation qui déterminent le poids des critères à partir de préférences exprimées, ou qui combinent des points de vue divergents, peuvent masquer la véritable base de la décision.

### II.5.2.2 Processus hiérarchique analytique

Le Processus Analytique Hiérarchique (AHP), développé par Saaty [71], repose sur la décomposition d'un problème complexe de décision multicritère en une structure hiérarchique. L'objectif principal se situe au niveau supérieur, tandis que les critères et sous-critères occupent les niveaux intermédiaires. Les alternatives de décision se trouvent quant à elles au niveau le plus bas de cette hiérarchie [73,74].

Cette théorie repose sur la comparaison par paires et s'appuie principalement sur le jugement d'experts pour déterminer les échelles de priorité. Ces comparaisons utilisent une échelle de jugements absolus, où chaque jugement exprime le degré de domination d'un attribut par rapport à un autre, pour un critère donné. Pour établir la décision finale et générer les priorités, le processus doit être décomposé en plusieurs étapes, comme suit :

- **Première étape** : identifier le problème et formuler précisément les connaissances ou objectifs recherchés.
- **Deuxième étape** : construire une structure hiérarchique descendante, avec l'objectif principal au sommet, suivi des critères généraux, puis des sous-critères intermédiaires, jusqu'au niveau le plus bas qui correspond généralement aux alternatives de décision (voir figure II.3).
- **Troisième étape** : Établir les matrices de comparaisons par paires entre les éléments d'un même niveau par rapport à un élément du niveau supérieur. Chaque matrice compare deux à deux les éléments du niveau inférieur en fonction d'un critère du niveau supérieur.
- **Dernière étape** : calculer les priorités locales et globales : les priorités issues des matrices sont utilisées pour pondérer celles du niveau supérieur. Cette opération est répétée pour tous les éléments de la hiérarchie. Enfin, la priorité globale de chaque alternative est obtenue en agrégeant ces valeurs pondérées, ce qui permet de classer les alternatives selon leur score global.

L'application optimale de ce processus nécessite l'utilisation d'une échelle numérique indiquant combien de fois un élément est plus important ou dominant qu'un autre, selon un critère donné (voir tableau II.5). Pour plus de détails sur cette méthode, le lecteur peut consulter l'étude [75].

Table II.5 Échelle de comparaison utilisée pour la comparaison paire à paire.

Degré d'importance	Échelle
1	Importance égale
3	Importance modérée d'un attribut par rapport à un autre.
5	Forte importance d'un attribut par rapport à un autre.
7	Importance très forte d'un attribut par rapport à un autre
9	Importance extrême d'un attribut par rapport à un autre.
1/2, 1/3, 1/4, 1/5, 1/6, 1/7, 1/8, 1/9	Légère importance d'un attribut par rapport à un autre, avec un degré d'importance égal dans les deux sens (évaluation réciproque).

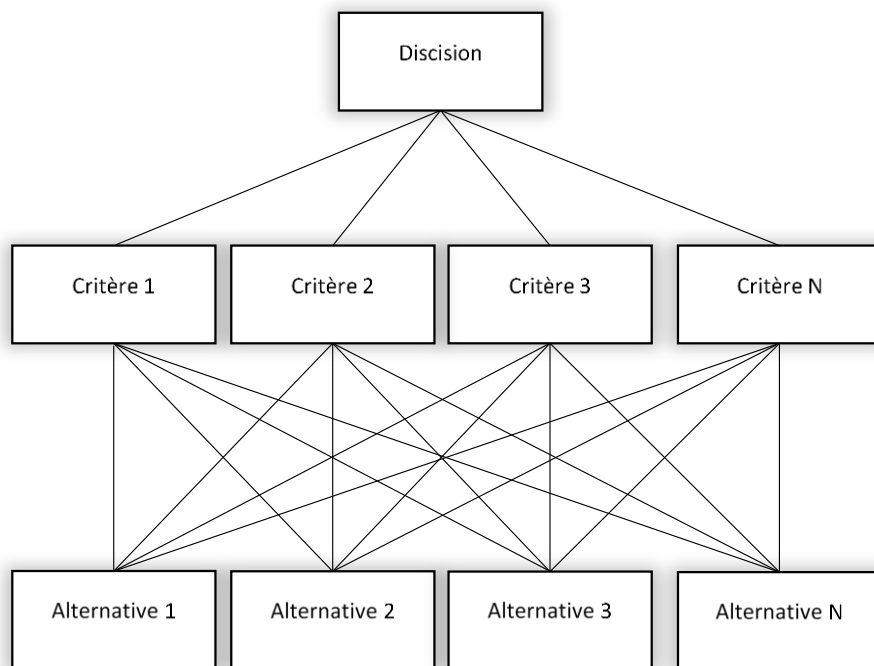


Figure II.3 Principe de la méthode AHP.

### II.5.2.3 Processus hiérarchique analytique flou

Le Processus de Hiérarchie Analytique (AHP) est une technique bien connue et complète de prise de décision multicritère, développée par Saaty en 1980 [75]. Elle permet d'évaluer l'importance relative des critères d'un ensemble en utilisant des comparaisons par paires. L'AHP utilise une échelle discrète, qui ne reflète pas toujours fidèlement la pensée humaine, car il n'est pas toujours pratique d'employer une échelle précise pour exprimer un jugement linguistique. Pour pallier cette limitation dans des environnements flous, le Processus de Hiérarchie Analytique Flou a été proposé. Son principe est d'utiliser des variables triangulaires floues pour effectuer les comparaisons par paires. De nombreuses méthodes ont été développées pour construire les matrices comparatives floues, mais la plupart peuvent conduire à des décisions erronées ou à des poids illogiques nuls. Dans ce contexte, Buckley a proposé une technique de pondération dont le déroulement est le suivant :

- **Phase 1** : Après la sélection des critères, les matrices de comparaison par paires sont établies selon les avis des experts, pour chaque dimension de la hiérarchisation. L'importance relative d'un critère par rapport à un autre est déterminée à partir des jugements des experts, exprimés en termes quantifiables. La comparaison par paires entre  $n$  critères est alors représentée comme suit :

$$\tilde{M} = \begin{bmatrix} 1 & \tilde{a}_{12} & \cdots & \tilde{a}_{1n} \\ 1/\tilde{a}_{21} & 1 & \cdots & \tilde{a}_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1/\tilde{a}_{n1} & 1/\tilde{a}_{n2} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{II.1})$$

Si le critère  $i$  est plus important que le critère  $j$ ,  $\tilde{a}_{ij} = \tilde{1}, \tilde{3}, \tilde{5}, \tilde{7}, \tilde{9}$  si non  $\tilde{a}_{ij} = \tilde{3}^{-1}, \tilde{5}^{-1}, \tilde{7}^{-1}, \tilde{9}^{-1}$ . Où :

Tableau II.6. Nombre triangulaire flou [76].

$\check{9}^{-1}$	$\check{7}^{-1}$	$\check{5}^{-1}$	$\check{3}^{-1}$	$\check{1}$	$\check{3}$	$\check{5}$	$\check{7}$	$\check{9}$
$(\frac{1}{9}, \frac{1}{9}, \frac{1}{7})$	$(\frac{1}{9}, \frac{1}{7}, \frac{1}{5})$	$(\frac{1}{7}, \frac{1}{5}, \frac{1}{3})$	$(\frac{1}{5}, \frac{1}{3}, 1)$	(1,1,3)	(1,3,5)	(3,5,7)	(5,7,9)	(7,9,9)

- **Phase 2 :** Le calcul des poids flous des dimensions est réalisé à l'aide de l'approche de la moyenne géométrique, comme présenté dans l'équation (II.2).

$$\check{r}_i = (\check{a}_{i1} \times \check{a}_{i2} \times \dots \times \check{a}_{in})^{1/n} \quad (\text{II.2})$$

- **La phase 3 :** Cette étape consiste à exprimer les poids flous de chaque critère à partir des résultats obtenus lors de la phase précédente.

$$\check{w}_i = \check{r}_i \times (\check{r}_1 + \check{r}_2 + \dots + \check{r}_n)^{-1} \quad (\text{II.3})$$

Le poids flou  $\check{w}$  du critère  $i$  est obtenu comme suit :  $\check{w}_i = (lw_i, mw_i, uw_i)$ .

Où :  $lw_i$ ,  $mw_i$  et  $uw_i$  représentent respectivement les valeurs inférieure, moyenne et supérieure du poids flou  $\check{w}$  pour le critère  $i$ .

- **Phase 4 :** Pour calculer une valeur précise du poids flou  $\check{w}$  du critère  $i$ , on utilise la technique du centre de gravité (CoA), comme indiqué dans l'équation (III.4).

$$w_i = [((uw_i - lw_i) + (mw_i - lw_i)) / 3] + lw_i \quad (\text{II.4})$$

## II.7. Conclusion

Le début de ce chapitre a été consacré à la définition des concepts fondamentaux de la gestion des risques, suivi d'une présentation de la démarche correspondante. En nous appuyant sur une littérature abondante, nous avons ensuite offert une vue d'ensemble des différentes techniques d'analyse de risque utilisées dans cette étude : l'arbre de défaillances, l'analyse multicritère de décision et la logique floue.

En effet, une approche quantitative dans la gestion des risques constitue une base solide pour une évaluation rigoureuse et une gestion proactive. Cependant, en raison du manque de données, l'utilisation exclusive des méthodes quantitatives peut s'avérer complexe. C'est pourquoi l'avis des experts, ainsi que les méthodes issues de l'analyse multicritère de décision et de la logique floue, présentent un intérêt majeur dans le processus de gestion des risques. À cet effet, la combinaison des méthodes présentées dans ce chapitre sera approfondie dans le chapitre suivant.

## **CHAPITRE III**

### ***Intelligence artificielle et analyse de risque***

### III.1. Introduction

Depuis plus de 65 ans, l'étude de l'intelligence artificielle (IA) représente une quête continue pour les scientifiques et les ingénieurs. L'idée de base est simple : les machines conçues par l'homme peuvent accomplir bien plus que des tâches nécessitant un important travail manuel ; elles sont désormais capables de développer une forme d'intelligence comparable à celle de l'être humain. Que nous en soyons conscients ou non, l'IA s'est progressivement intégrée dans notre quotidien, jouant un rôle sans précédent dans des secteurs tels que l'industrie, la santé, les transports, l'éducation, et bien d'autres domaines accessibles au grand public. Considérée comme l'un des principaux moteurs du changement socio-économique, l'IA contribue également à l'avancement des technologies de pointe dans de nombreux domaines de recherche, en fournissant des outils précieux pour stimuler l'innovation scientifique [77-78].

Dans ce chapitre, nous aborderons les concepts fondamentaux des techniques les plus réputées en intelligence artificielle, notamment la logique floue, les réseaux de neurones, les systèmes d'inférence neuro-flous adaptatifs, ainsi que certains algorithmes d'optimisation méta-heuristiques.

### III.2. Réseau de Neurones

Les réseaux neuronaux constituent des structures massivement interconnectées, capables de modéliser des fonctions non linéaires complexes avec une grande précision. Leur architecture s'inspire de celle des neurones du cerveau humain.

Les réseaux neuronaux, ou plus précisément les réseaux neuronaux artificiels, sont des systèmes mathématiques inspirés de notre compréhension des réseaux neuronaux biologiques.

Les réseaux neuronaux sont particulièrement intéressants en tant que dispositifs de calcul, capables de traiter un grand nombre d'entrées et d'apprendre à partir d'échantillons d'entraînement, sans qu'il soit nécessaire de spécifier explicitement les règles de fonctionnement. En tant que modèles mathématiques des réseaux neuronaux biologiques, ils sont utiles pour établir des relations complexes entre les entrées et les sorties de tout type de système. En somme, un réseau neuronal est constitué d'un ensemble de neurones artificiels. Un neurone artificiel correspond à une représentation mathématique simplifiée d'un neurone biologique [77]. La Figure III.1 illustre un exemple de réseau de neurones artificiels.

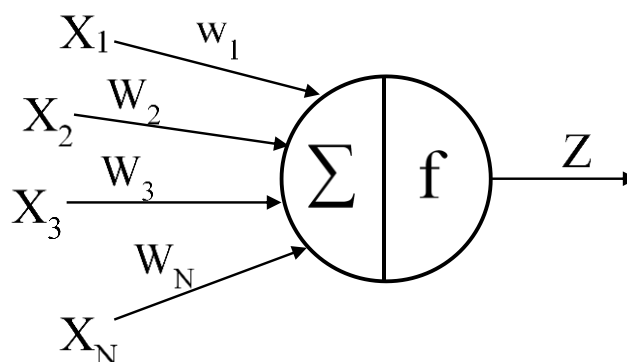


Figure III.1. Exemple d'un réseau de neurones artificiels.

Comme l'indique la figure ci-dessus, un réseau de neurones traduit la relation entre les entrées et la sortie à l'aide d'une unité de calcul appelée perceptron ou corps cellulaire. Le perceptron constitue l'unité de base chargée du traitement de l'information : il permet de

transformer le signal d'entrée en un signal de sortie à l'aide d'une fonction appelée fonction d'activation. Le tableau III.1 présente les fonctions d'activation couramment utilisées dans les réseaux de neurones.

**Tableau III.1.** Fonction d'activation fréquemment utilisées dans les réseaux de neurones.

Fonction d'activation	Formule	symboles
Fonction sign	$f(x) = \begin{cases} -1 & \text{si } x \leq 0 \\ 1 & \text{si } x \geq 0 \end{cases}$	x est le variable de décision
Fonction linéaire	$f(x) = ax + b$	a et b sont respectivement les coefficients d'orientation et d'intersection
Fonction de saturation	$f(x) = \begin{cases} -1 & \text{si } x \leq -b \\ ax + b & \text{si } -b \leq x \leq b \\ 1 & \text{si } x \geq b \end{cases}$	a et b sont respectivement les coefficients d'orientation et d'intersection
Fonction gaussienne	$f(x) = e^{-\frac{(x-c)^2}{\sigma^2}}$	a et b sont respectivement l'espérance et l'écart type
Fonction sigmoïde	$f(x) = \frac{1}{(1+e^{-x})}$	x est le variable de décision

### III.2.1. Principe de l'approche

La structure fondamentale d'un réseau de neurones comprend généralement des unités de calcul (ou éléments de traitement) ainsi que les interconnexions entre ces unités. Chaque unité de traitement, appelée neurone ou corps cellulaire, est reliée aux autres par des connexions nommées synapses, chacune étant associée à un poids synaptique. Un neurone reçoit une information, appelée stimulus, en provenance des neurones connectés en amont. Il traite ensuite cette information et génère une sortie. Les neurones d'entrée reçoivent les données directement de l'environnement extérieur, tandis que les neurones de sortie fournissent les résultats finaux du réseau. Entre ces deux couches se trouvent les neurones cachés, qui reçoivent des stimuli d'autres neurones et transmettent leurs signaux à d'autres unités du réseau. Différentes architectures de réseaux neuronaux peuvent être construites en combinant divers types de neurones, organisés selon des schémas de connexion variés [78].

Parmi les architectures de réseaux de neurones, la plus connue est celle du Perceptron multicouche, ou Multi-Layer Perceptron (MLP) en anglais. Dans un MLP, les neurones sont organisés en couches successives. La première couche correspond à la couche d'entrée, tandis que la dernière représente la couche de sortie. Les couches situées entre les deux sont appelées couches cachées. Un MLP est donc généralement constitué d'une couche d'entrée, d'une ou plusieurs couches cachées, et d'une couche de sortie. Par exemple, un réseau MLP comportant une couche d'entrée, une couche cachée et une couche de sortie est désigné comme un MLP à trois couches, ou MLP-3, comme l'illustre la Figure III.2.

Le nombre de neurones dans la couche d'entrée est noté  $N_i$ , dans la couche intermédiaire  $N_j$  et dans la couche de sortie  $N_o$ .  $w_{ji}$  indique le poids de la liaison entre le  $i$ -ème neurone [ $N_1, N_2, N_3, \dots, N_i$ ] de la première couche et le  $j$ -ème nœud [ $N_1, N_2, N_3, \dots, N_j$ ] de la couche cachée.  $w_{oj}$  indique le poids de la relation entre le  $o$ -ème nœud [ $N_1, N_2, N_3, \dots, N_o$ ] et la couche de sortie au  $j$ -ème nœud de la couche intermédiaire.  $x_i$  représente l'entrée, et  $O_i^{(i)}$  est la sortie du  $i$ -ème nœud de la couche d'entrée.  $in_j^{(i)}$  représente l'entrée du  $j$ -ème neurone, et  $O_j^{(i)}$  sa sortie dans la

couche cachée. Enfin,  $In_o^{(o)}$  indique l'entrée du  $o$ -ème neurone, et  $O_o^{(o)}$  sa sortie dans la couche de sortie.

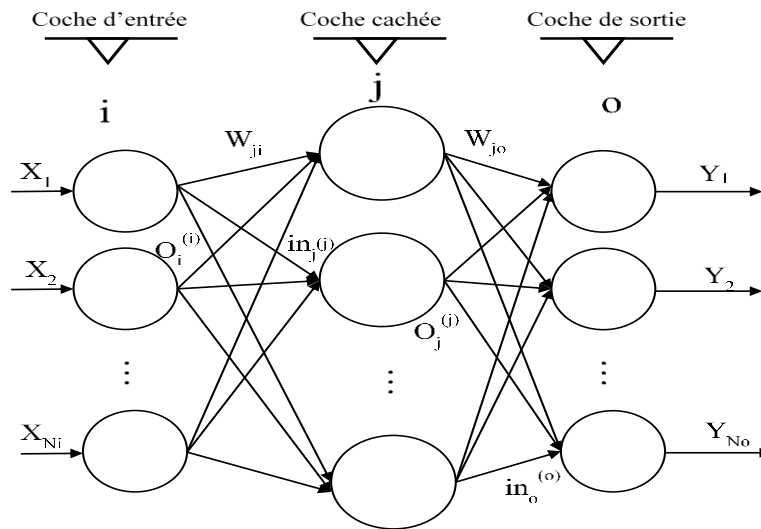


Figure III.2. Structure d'un MLP 3.

Dans un réseau MLP, chaque neurone transforme l'information reçue des neurones de la couche précédente. Ce traitement repose sur l'application d'une fonction d'activation, qui permet de transférer le signal traité sous forme de sortie.

Par exemple, chaque neurone de la couche cachée reçoit un stimulus provenant des neurones de la couche d'entrée. Un neurone typique, tel que le  $j$ -ème nœud de la couche intermédiaire, traite l'information en deux étapes principales.

Premièrement, chaque entrée est multipliée par son poids synaptique correspondant, puis les résultats sont additionnés afin d'obtenir la somme pondérée  $in_j^{(i)}$  définie comme suit :

$$in_j^{(i)} = \sum_{i=1}^{N_i} w_{ji} O_i^{(i)} \quad (III.1)$$

Deuxièmement, la somme pondérée  $in_j^{(i)}$  définie dans l'équation précédente est utilisée comme argument de la fonction d'activation du neurone, ce qui permet de calculer la sortie finale  $O_j^{(i)}$  selon la relation suivante :

$$O_j^{(i)} = f(in_j^{(i)}) \quad (III.2)$$

Cette sortie constitue à son tour un stimulus transmis aux neurones de la couche suivante, jusqu'à atteindre la couche de sortie finale.

### III.2.2. Objectifs de l'approche

Les objectifs principaux des réseaux de neurones sont les suivants :

- **Apprentissage et généralisation** : Apprendre des modèles complexes à partir des données afin de pouvoir généraliser efficacement à de nouvelles données.
- **Approximation de fonctions complexes** : Fournir des approximations précises de relations complexes sans qu'il soit nécessaire de recourir à une modélisation explicite.
- **Auto-adaptation** : S'adapter et s'améliorer continuellement grâce à l'intégration de nouvelles données, permettant ainsi un apprentissage progressif.
- **Robustesse et précision** : Maintenir des performances fiables et précises, même lorsque les données sont bruitées ou incomplètes.

### III.2.3. Déroulement

Le fonctionnement d'un réseau de neurones s'effectue en plusieurs étapes clés :

1. Identifier les entrées et les sorties du réseau de neurones.
2. Préparer les données associées à chaque entrée et sortie du réseau.
3. Définir la structure du réseau.
4. Choisir l'algorithme d'optimisation approprié et définir ses paramètres.
5. Initialiser de manière aléatoire les poids de chaque connexion du réseau.
6. Fixer le nombre d'itérations et lancer la boucle d'apprentissage.
7. Comparer les résultats produits par le réseau avec les sorties réelles afin d'évaluer sa performance.
8. Mettre à jour les poids du réseau à l'aide de l'algorithme d'optimisation sélectionné.
9. Vérifier si les conditions d'arrêt (nombre d'itérations, seuil d'erreur minimale, etc.) sont satisfaites. Si oui, retourner les résultats obtenus ; sinon, revenir à l'étape 7.

### III.2.4. Les avantages et les inconvénients de l'approche

Les points forts des réseaux de neurones sont :

- Approximation de fonctions complexes.
- Capacité d'autoréglage.
- Flexibilité et précision.
- Facilité d'intégration aux systèmes d'aide à la décision.

Les limites de la technique proposée sont :

- Nécessite des données réelles et exactes.
- Sensibilité aux incertitudes.
- Risque de surestimation.
- Nécessite un choix minutieux des prédicteurs (les entrées).
- Problèmes avec les données non numériques (données floues, catégorielles, textuelles).

## III.3. La Logique Floue

La logique floue a été initialement introduite par Lotfi A. Zadeh en 1965. Il a proposé une nouvelle manière de représenter les incertitudes et les informations imprécises, dépassant la traditionnelle représentation binaire. La première application concrète de cette approche a eu lieu au Japon, dans le contrôle de systèmes tels que les machines à laver, les climatiseurs, et les systèmes de métro. Depuis lors, la logique floue a connu un succès considérable dans divers domaines, notamment les systèmes automobiles (par exemple, les systèmes de transmission et les freins antiblocages), les systèmes décisionnels, ainsi que la robotique [79].

La logique floue relève des mathématiques. Contrairement à la logique booléenne, elle permet d'exprimer plusieurs degrés de vérité, au lieu de se limiter aux valeurs binaires 0 et 1 (par exemple, le moteur peut être chaud, très chaud, ou à différents niveaux intermédiaires) [80].

### III.3.1. Principe de l'approche

En général, un système flou repose sur une logique multiniveau, où les valeurs de vérité d'une variable peuvent prendre n'importe quelle valeur réelle comprise entre 0 et 1, inclusivement. Cette logique permet d'appliquer le concept de vérité partielle, offrant ainsi une gradation allant de complètement vrai à complètement faux [81]. Alors que les calculs mathématiques classiques manipulent des variables numériques, la logique floue utilise des

variables linguistiques, qui peuvent être exprimées à l'oral ou sous forme non numérique [82]. Ces variables linguistiques sont définies à partir d'un ensemble de termes linguistiques, eux-mêmes constitués de mots ou d'expressions spécifiques qui caractérisent les attributs de ces variables. La Figure III.3 illustre les différentes étapes du fonctionnement d'un système flou. Dans ce processus, les variables linguistiques sont d'abord converties en valeurs floues numériques. Ensuite, les sorties floues sont calculées en fonction des règles définies dans la base de règles floues, avant d'être transformées en valeurs précises via une opération de défuzzification [83].

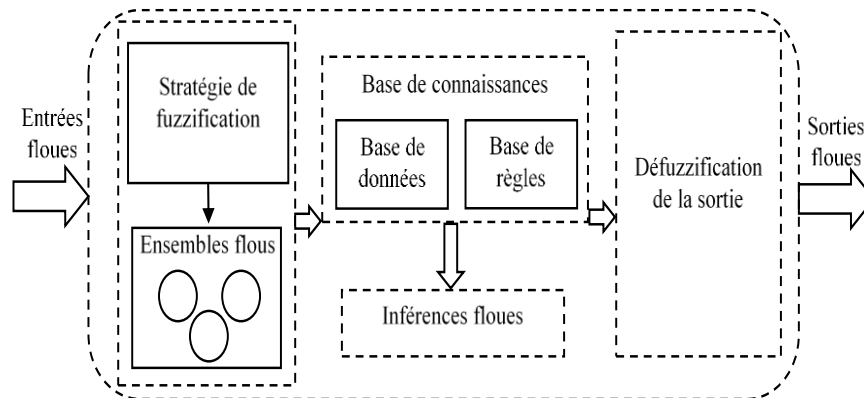


Figure III.3 Les étapes de la logique floue.

### III.3.2. Objectifs de l'approche

Les objectifs principaux de la logique floue sont les suivants :

- Gérer l'incertitude et l'ambiguïté.
- Modéliser le raisonnement et les processus de prise de décision humains.
- Renforcer la robustesse et la flexibilité.
- Simplifier la conception de systèmes complexes.

### III.3.3. Les entrees du system flou

Dans la logique floue, les entrées correspondent aux variables représentant les facteurs ou caractéristiques d'un système ou d'un processus modélisé. Ces entrées sont généralement des variables linguistiques, c'est-à-dire qu'elles sont décrites à l'aide de termes qualitatifs plutôt que par des valeurs numériques exactes. Ces variables d'entrée jouent un rôle essentiel dans la prise de décision et dans la détermination du comportement du système flou.

### III.3.4. Déroulement

Le déroulement d'un processus basé sur la logique floue comprend généralement quatre étapes principales, à savoir :

- **Fuzzification** : Phase initiale du processus d'un système d'inférence floue (FIS), consiste à convertir les valeurs brutes en fonctions d'appartenance associées aux variables linguistiques des ensembles flous. Autrement dit, des termes linguistiques tels que élevé (H), très élevé (VH), moyen (M), faible (L) ou très faible (VL) sont utilisés pour transformer des valeurs numériques précises en valeurs floues. Ces degrés d'appartenance sont ensuite exploités dans les règles floues de type « si... alors... » (if-then).
- **Base de connaissances** : Le système de connaissances se compose de deux éléments principaux : une base de données et une base de règles. La base de données définit les

fonctions d'appartenance des ensembles flous, qui sont utilisées pour générer les règles floues. Quant à la base de règles, elle est constituée des règles floues de type (if-then), également appelées énoncés conditionnels flous, qui établissent les relations entre les entrées et les sorties. La structure générale des règles if-then pour le FIS de Mamdani est la suivante :

$$\text{if } x_1 \text{ is } A_1^{j_1} \text{ and } x_2 \text{ is } A_2^{j_2} \text{ and } \dots \text{ and } x_n \text{ is } A_n^{j_n} \text{ then } y_f \text{ is } C^k \quad (\text{III.3})$$

Où  $j_i \in \{1, 2, \dots, N\}$ ,  $i = \{1, 2, \dots, N\}$ ,  $A_i^{j_i}$  et  $C^k$  représentent respectivement les termes linguistiques de la fonction d'appartenance de la variable d'entrée ( $x_i$ ) et de la variable de sortie ( $y_f$ ) dans la règle Nth.

- **Moteur d'inférence floue** : L'unité d'inférence floue établit une correspondance entre les entrées et les sorties floues en s'appuyant sur la logique floue. Elle utilise les fonctions d'appartenance, les opérations logiques, ainsi que les règles de type if-then. Cette phase constitue le cœur du système flou, car elle guide le processus de modélisation du comportement du système. Elle combine les faits obtenus lors de la phase de fuzzification avec les règles contenues dans la base de règles. Le modèle flou de Mamdani peut être construit à l'aide de différentes techniques de composition floue. Dans cet essai, on applique la méthode la plus répandue : la composition maximale (max-min composition). Cette méthode peut être décrite mathématiquement par l'équation suivante :

$$\mu_{CN}(y_f) = \max[\min[\mu_{AN}(\text{entrée}(x)), \min[\mu_{BN}(\text{entrée}(y)), \dots]] \quad N=1, 2, \dots \quad (\text{III.4})$$

Où  $\mu_{CN}(y_f)$  représente l'appartenance de la sortie ( $y_f$ ) pour la N-ème règle, et  $\mu_{AN}$  et  $\mu_{BN}$  sont les fonctions d'appartenance des variables d'entrée "x" et "y", respectivement.

- **Défuzzification** : Enfin, dans le cadre d'un système d'inférence floue de type Mamdani, le processus de défuzzification permet de convertir les ensembles flous en valeurs nettes exploitables. Parmi les méthodes de défuzzification les plus couramment utilisées figure la méthode du centre de gravité (Center of Area, COA). Cette technique présente l'avantage de prendre en compte l'ensemble des règles activées, en intégrant les contributions de toutes les sorties floues lors du processus de défuzzification. En appliquant l'équation (II.3), les ensembles flous issus de l'étape d'inférence sont ainsi transformés en valeurs précises.

$$y_{gCOA}^* = \frac{\int y_g \mu_A(y_g) dy_g}{\int \mu_A(y_g) dy_g} \quad (\text{III.5})$$

### III.3.5. Les sorties de l'approche

Dans la logique floue, les sorties correspondent aux résultats ou aux actions déterminés par le système à partir des entrées et des règles floues prédéfinies. Comme pour les entrées, ces sorties sont généralement formulées en tant que variables linguistiques, exprimées à l'aide de termes qualitatifs plutôt que de valeurs numériques exactes. Elles résultent d'un processus en plusieurs étapes : fuzzification des entrées, traitement via la base de connaissances (incluant les fonctions d'appartenance et les règles), application de l'inférence floue, puis défuzzification pour convertir les résultats flous en valeurs nettes ou en actions concrètes.

### III.3.6. Les avantages et les inconvénients de l'approche

Les points forts de la logique floue sont :

- Gérer les incertitudes.
- Flexibilité dans la modélisation.
- Adaptabilité.
- Tolérance aux imperfections des données.
- Interprétation intuitive.

Les limites de la technique proposée sont :

- Subjectivité dans la formulation des règles.
- Difficultés de modélisation.
- Un formalisme restreint.
- Exigences et sensibilité des données.

### III.4. System d'inférence neuro-flou adaptatif (ANFIS)

La logique floue permet d'incorporer les connaissances d'experts pour modéliser des relations entre les entrées et les sorties d'un système, à l'aide de variables linguistiques non numériques telles que faible, élevé, modéré, etc. Ces variables sont ensuite utilisées pour formuler des règles d'inférence floues (règles si... alors) qui décrivent le comportement du modèle. Cependant, la dépendance à l'expertise humaine peut poser problème dans certaines applications où les connaissances expertes sont limitées ou difficiles à formaliser [84]. Les réseaux neuronaux, en revanche, possèdent la capacité d'apprentissage automatique, s'ajustant dynamiquement à partir des données à l'aide d'algorithmes évolutionnaires, tels que la descente de gradient et la rétro propagation, qui visent à minimiser l'erreur de prédiction. Cette capacité permet de réduire la nécessité d'une expertise humaine explicite. Pour combiner les avantages des deux approches, les chercheurs ont développé un modèle hybride : le système neuro-flou adaptatif, connu sous le nom d'ANFIS [85]. Ce modèle intègre la souplesse de la logique floue et le pouvoir d'apprentissage des réseaux neuronaux, tout en atténuant les limites de chacun. La Figure III.4 illustre un modèle ANFIS typique, structuré en cinq couches distinctes, chacune ayant une fonction spécifique dans le traitement de l'information.

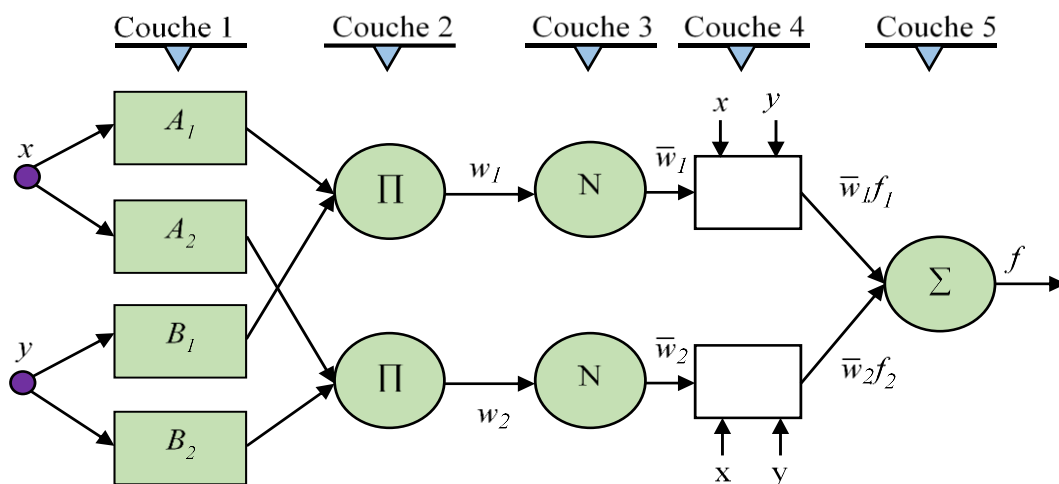


Figure III.4 La structure de L'INFIS.

Supposons maintenant une architecture floue de Takagi-Sugeno de premier ordre, dans laquelle l'ensemble des règles floues peut être formulé comme suit :

$$\text{if } x \text{ is } A_i \text{ and } y \text{ is } B_i \text{ then } f_i = p_i x + q_i y + r_i \quad (\text{III.6})$$

Où  $x$  et  $y$  indiquent les entrées non floues,  $f$  représente la sortie,  $A_i$  et  $B_i$  représentent les fonctions d'appartenance de la  $i$ ème règle, et  $p_i$ ,  $q_i$  et  $r_i$  représentent les critères linéaires de la fonction de sortie.  $O_i^j$  représente la sortie du  $i$ ème nœud de la couche  $j$  [86].

La première couche, appelée couche de fuzzification, est chargée de calculer les degrés d'appartenance flous pour chaque entrée. Ces degrés sont évalués à l'aide des fonctions d'appartenance, conformément aux équations III.7 et III.8.

$$O_i^1 = \mu_{A_i}(x) \quad (\text{III.7})$$

$$O_i^1 = \mu_{B_i}(y) \quad (\text{III.8})$$

Où  $\mu_{A_i}(x)$  et  $\mu_{B_i}(y)$  représentent la fonction d'appartenance.  $x$  et  $y$  représentent tous deux l'entrée de la couche 1. Dans cette étude, la fonction d'appartenance gaussienne a été sélectionnée pour chaque entrée pour les raisons suivantes : (1) elle décrit efficacement les entrées, (2) elle fournit une bonne sensibilité du FLS, (3) elle donne de meilleurs résultats, (4) elle peut être facilement mise en œuvre et elle est simple à manipuler dans la phase de réglage [87].

$$\mu_{A_i} = \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x-c_i}{\sigma_i}\right)^2\right) \quad (\text{III.9})$$

Où  $\sigma_i$  et  $c_i$  indiquent tous deux la variance et la moyenne de la fonction gaussienne.

Dans la deuxième couche, les signaux issus de la première couche sont multipliés entre eux pour chaque règle. Cette opération permet de calculer le degré d'activation de chaque règle, et peut être exprimée mathématiquement comme suit :

$$O_i^2 = w_i = \mu_{A_i}(x)\mu_{B_i}(y) \quad (\text{III.10})$$

Où  $w_i$  représentant la force des règles tirées.

La troisième couche : normalise les signaux issus de la deuxième couche. Les signaux obtenus de cette couche peuvent être exprimés par l'équation suivante :

$$O_i^3 = \bar{w}_i = \frac{w_i}{\sum w_i} \quad (\text{III.11})$$

Où  $\bar{w}_i$  représente le poids normalisé.

La couche 4 (couche de défuzzification) : Les signaux résultants de chaque nœud de la couche 4 sont défuzzifiés selon l'équation III.12.

$$O_i^4 = \bar{w}_i f_i = \bar{w}_i(p_i x + q_i y + r_i) \quad (\text{III.12})$$

Enfin, la cinquième couche est la couche de sommation : elle effectue la sommation de tous les signaux d'entrée-sortie est obtenue par l'agrégation de ces signaux :

$$O_i^5 = \sum_i^n \bar{w}_i f_i = \frac{\sum_i w_i f_i}{\sum_i w_i} \quad (\text{III.13})$$

### III.5. Les algorithmes méta-heuristiques

#### III.5.1. Optimisation par essaims de particules (PSO)

PSO représente une approche globale fondée sur les essaims. Elle imite le comportement des oiseaux à la recherche de nourriture. Elle génère de manière aléatoire un ensemble de

populations appelées particules pour rechercher la meilleure solution à un problème à N dimensions. Les principales caractéristiques du mouvement de chaque particule sont leur vitesse et leur position dans l'espace à N dimensions [88-97], qui sont données par :

$$V_{i,j}^{t+1} = wV_{i,j}^t + c_1 r_{1i,j}^t (p_{i,best}^t - x_{i,j}^t) + c_2 r_{2i,j}^t (G_{best}^t - x_{i,j}^t) \quad (III.14)$$

$$X_{i,j}^{t+1} = V_{i,j}^{t+1} + x_{i,j}^t \quad (III.15)$$

Où  $c_1$  et  $c_2$  représentent respectivement les coefficients d'apprentissage personnel et global ;  $r_1$  et  $r_2$  représentent tous deux des variables aléatoires dans l'intervalle (0, 1).  $p_{i,best}^t$  et  $G_{best}^t$  indiquent respectivement la position quasi-optimale de la ième particule obtenue à l'itération t et la meilleure position globale obtenue dans l'ensemble de l'essaim.  $x_{i,j}^t$  et  $X_{i,j}^{t+1}$ ,  $V_{i,j}^t$  et  $V_{i,j}^{t+1}$  sont respectivement la position et la vitesse du ième candidat dans la jème dimension à l'itération (t) et à l'itération suivante (t+1). Le coefficient w représente le poids d'inertie qui contrôle les capacités de recherche globale et personnelle de chaque particule en fonction des itérations. Figure III.5 indique les étapes de l'algorithme PSO.

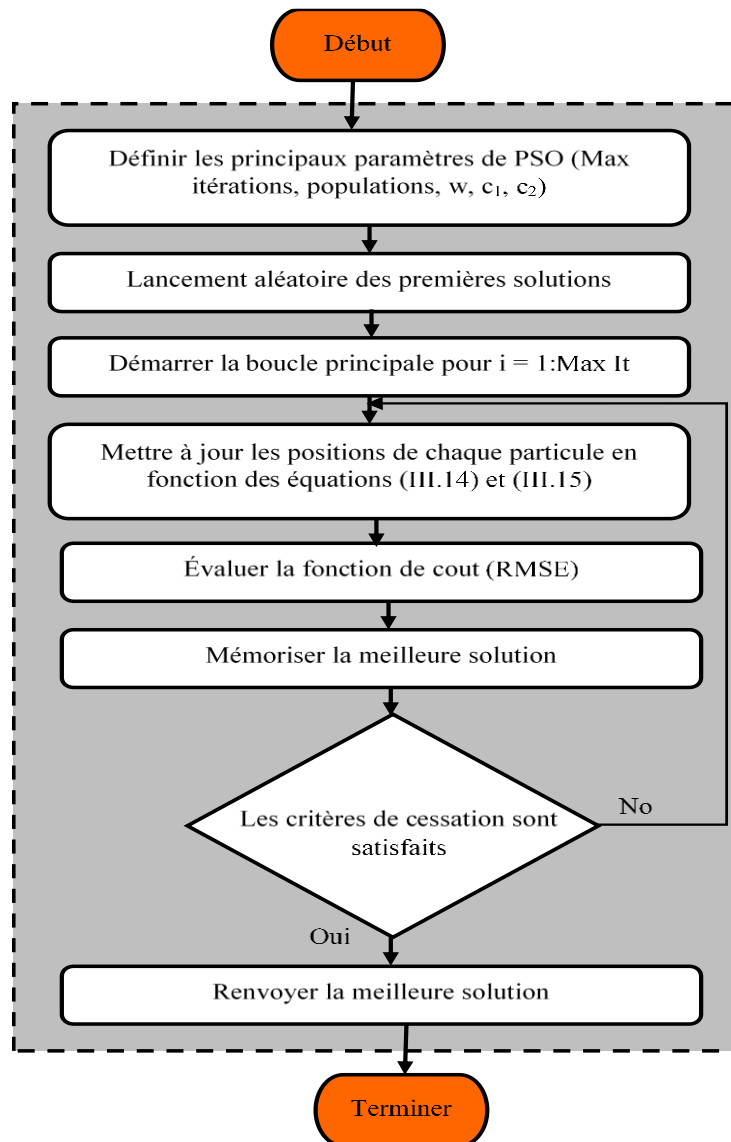


Figure III.5 Les étapes de l'algorithme PSO

### III.5.2. Algorithme de la luciole (FA)

L'algorithme des lucioles (FA, Firefly Algorithm) est une approche méta-heuristique appartenant à la famille des techniques basées sur les essais, reposant sur un modèle mathématique relativement simple. Il a été introduit pour la première fois par Xin-She Yang [98]. Le FA s'inspire du comportement social et lumineux des lucioles, observé principalement la nuit. Il est largement utilisé pour résoudre divers problèmes d'optimisation et d'ingénierie. L'algorithme mobilise un ensemble de lucioles (solutions candidates), qui explorent un espace de recherche afin d'identifier la solution optimale. Chaque luciole est attirée par les autres en fonction de leur intensité lumineuse, laquelle est déterminée par une fonction d'évaluation (ou score de fitness). Indépendamment de leur sexe, les lucioles convergent vers les individus les plus attractifs, c'est-à-dire ceux ayant la plus forte intensité lumineuse, représentant ainsi les meilleures solutions du problème [99]. Les principales étapes de l'algorithme des lucioles sont illustrées dans le schéma III.6.

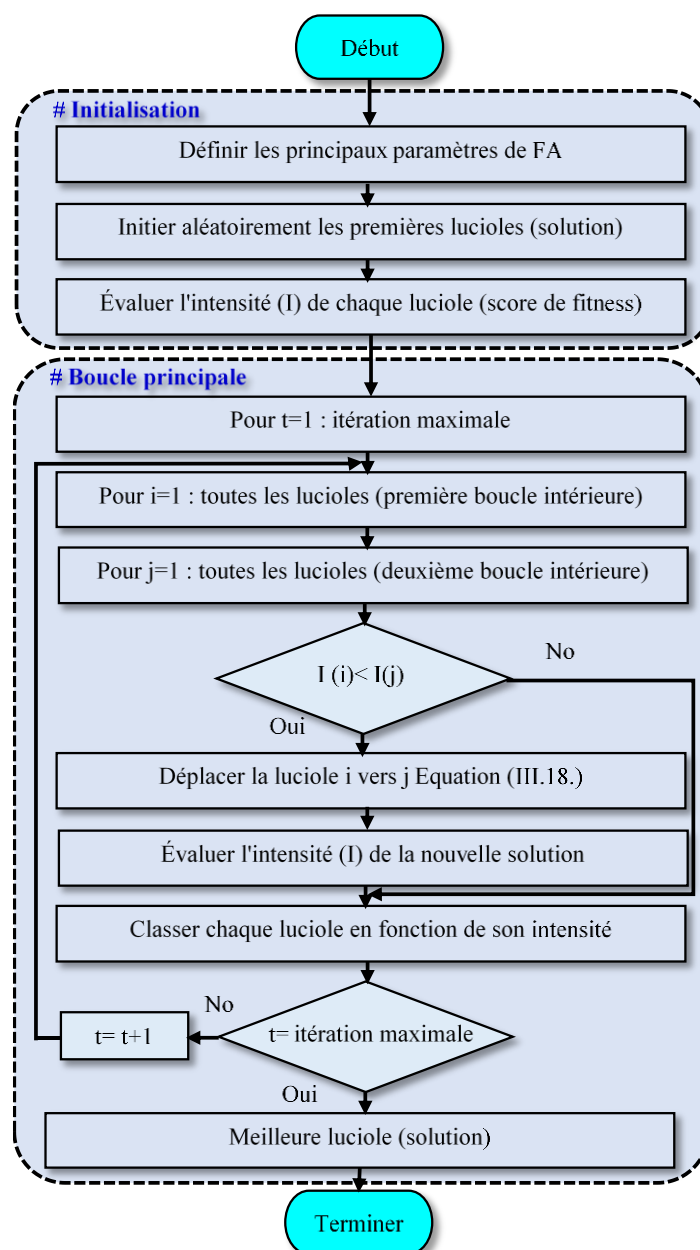


Figure III.6 Organigramme de l'algorithme FA.

Soit  $x_i$  le  $i$ ème candidat de l'essaim (population). La luminosité (attractivité) entre deux lucioles  $x_i$  et  $x_j$  peut être calculée par l'équation (III.16).

$$\beta(r_{ij}) = \beta_0 \exp(-\gamma r_{ij}^2) \quad (\text{III.16})$$

Où,  $\beta(r_{ij})$  indique l'attractivité de la luciole,  $\beta_0$  représente l'attractivité de la luciole à  $r=0$ ,  $\gamma$  est le coefficient de lumière,  $r_{ij}$  indique la distance entre  $x_i$  et  $x_j$  et se calcule comme suit :

$$r_{ij} = \|x_j - x_i\| = \sqrt{\sum_{d=1}^n (x_{jd} - x_{id})^2} \quad (\text{III.17})$$

La luciole  $x_i$  est comparée à d'autres candidats  $x_j$  parmi la population. Si  $x_j$  est plus brillant (meilleur) que  $x_i$ , il sera attiré et convergera vers  $x_j$ . Ce mouvement est décrit par l'équation suivante :

$$x_i(t+1) = x_i(t) + \beta_0 \exp(-\gamma r_{ij}^2) (x_j(t) - x_i(t)) + \alpha(r - \frac{1}{2}) \quad (\text{III.18})$$

Où  $n$  indique le nombre des candidats,  $\alpha$  paramètre aléatoire et  $r$  est un nombre aléatoire. L'intensité lumineuse  $I_i$  à  $x_i$  est déterminée par la fonction de coût  $f(x_i)$ .

### III.5.3. Algorithme compétitif impérialiste (ICA)

L'Imperialist Competitive Algorithm (ICA) est une méta-heuristique d'optimisation relativement récente, initialement proposée par Atashpaz-Gargari et Lucas [100]. Cet algorithme s'inspire des dynamiques de pouvoir entre nations, en modélisant le comportement des pays impérialistes cherchant à étendre leur domination sur les pays plus faibles, appelés colonies, en fonction de leur puissance relative. Dans ce modèle, le monde est constitué d'un ensemble d'empires, chacun composé d'un pays impérial (ou impérialiste) et de plusieurs colonies. Deux types de compétition régissent l'évolution de ces entités. La compétition interne (au sein de chaque empire, les colonies peuvent rivaliser entre elles, voire surpasser le pays impérial. Si une colonie devient plus puissante que l'impérialiste, elle peut alors prendre sa place) et la compétition externe (les empires s'affrontent entre eux pour prendre le contrôle des colonies les plus faibles d'autres empires. Cela permet aux empires dominants d'augmenter leur puissance globale au détriment des empires affaiblis).

Le processus simple précédemment décrit peut désormais être modélisé en six étapes principales : l'initialisation, l'assimilation, la concurrence interne, le calcul du coût total, la concurrence externe et enfin la finalisation.

#### III.5.3.1. Initialisation

Cette étape consiste à générer et évaluer les pays initiaux, puis à les répartir entre les empires selon une certaine stratégie, comme l'illustre la figure III.7. Dans un problème d'optimisation comportant  $Nvar$  variables, un pays est défini de la manière suivante :

$$\text{Country} = [p1, p2, p3, \dots, pNvar] \quad (\text{III.19})$$

La fonction de coût associée à chaque pays peut être évaluée selon l'expression suivante :

$$\text{Cost} = f(\text{country}) = f(p1, p2, p3, \dots, pNvar) \quad (\text{III.20})$$

L'algorithme génère un ensemble initial de  $Npop$  pays, parmi lesquels il sélectionne les  $Nimp$  pays les plus puissants pour constituer les impérialistes des empires initiaux. Ensuite, les

pays restants, appelés colonies, sont répartis entre ces empires en fonction de la puissance relative de chaque impérialiste.

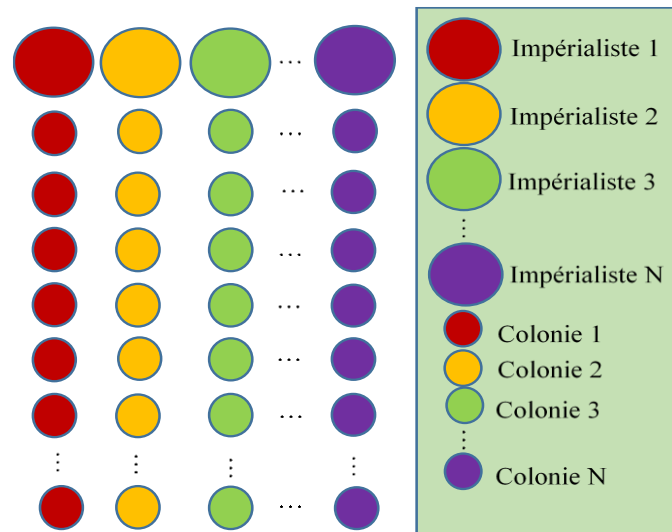


Figure III.7 Répartition des colonies entre les empires

Pour répartir les colonies entre les impérialistes, on calcule d'abord la probabilité de sélection suivante :

$$p = \exp\left(-\alpha \frac{C_n}{\max(C_n)}\right) \quad (\text{III.21})$$

Où  $\alpha$  est la pression de sélection et  $C_n$  est la fonction de coût impérialiste.

Nous définissons ensuite la sélection de probabilité normalisée comme suit :

$$p_n = \frac{p}{\sum p} \quad (\text{III.22})$$

Ensuite, à l'aide de la méthode de sélection par roulette [101], les colonies sont affectées aux empires correspondants en fonction de la fonction de coût de leur impérialiste.

### III.5.3.2. Assimilation

Cette étape, décrit comment chaque colonie converge vers l'impérialiste de son propre empire par une quantité  $x$ , générée à partir d'une distribution uniforme suivante :

$$x \sim U(x_{col}^t, \beta \times d) \quad (\text{III.23})$$

Où  $x_{col}^t$ ,  $\beta$  et  $d$  désignent la position actuelle de la colonie, est un nombre supérieur à 1 et la distance entre la colonie et l'impérialiste respectivement.

Ensuite, chaque empire tente d'améliorer la valeur de son score — un processus appelé révolution — en modifiant la position de certaines variables de ses impérialistes et de ses colonies, ces modifications étant générées à partir de la distribution normale suivante :

$$\theta \sim N(x_{imp}^t, \gamma \cdot (x_{max} - x_{min})) \quad (\text{III.24})$$

Où  $\theta$  indique une nouvelle position,  $x_{imp}^t$  est la position actuelle de l'impérialiste,  $\gamma$  est un nombre entre 0 et 1,  $x_{max}$  et  $x_{min}$  désignent la limite supérieure et inférieure de la variable de décision.

Toutefois, la position des colonies dans leur empire respectif peut être modifiée selon une probabilité prédéfinie ( $p_c$ ). Pour ce faire, une variable aléatoire est générée entre 0 et 1. Si cette variable est inférieure à ( $p_c$ ), les colonies subissent alors le processus de révolution décrit dans l'équation III.28, la seule différence étant que l'on remplace  $x_{imp}^t$  par  $x_{col}^t$ . Dans le cas contraire, aucune modification n'est effectuée.

Le nombre de variables susceptibles d'être modifiées pour améliorer la valeur de la fonction est déterminé selon la relation suivante :

$$N_c = \text{round}(\sigma \cdot N_{\text{var}}) \quad (\text{III.25})$$

Où  $\sigma$  est une constante qui sélectionnera le nombre de variables aléatoires,  $N_c$  qui pourraient être remplacées dans cette étape.

### III.5.3.3. Concurrence interne

Au cours du processus d'assimilation, une colonie peut atteindre une position dont le coût est inférieur à celui de son impérialiste. Dans ce cas, cette colonie prend la place de l'impérialiste et devient le nouveau leader de son empire.

### III.5.3.4. Coût total

Le coût total de chaque empire doit être mis à jour à chaque itération. Ce coût est principalement déterminé par la valeur de la fonction de coût de l'impérialiste lui-même. Toutefois, la puissance moyenne des colonies de l'empire a également un effet — bien que modéré — sur le coût global de l'empire. Cette relation peut être exprimée comme suit :

$$TC_n = \text{cost}(\text{imperialist}_n) + \xi \text{mean}\{\text{cost}(\text{colonies}_n)\} \quad (\text{III.26})$$

Où  $TC_n$  est le coût total d'un nième empire et  $\xi$  est un nombre positif considéré comme inférieur à 1.

### III.5.3.5. Concurrence extérieure

Cette étape modélise le processus par lequel chaque empire cherche à accroître sa puissance en prenant possession des colonies les plus faibles de l'empire le plus faible, jusqu'à potentiellement devenir l'empire dominant. Après la mise à jour du coût total de chaque empire, on calcule une probabilité de sélection (semblable à celle mentionnée dans la section 3.A) afin d'évaluer les chances de chaque empire de s'approprier une colonie de l'empire le plus faible. Une sélection par roulette est ensuite effectuée pour choisir l'empire qui prendra le contrôle de cette colonie. Ce mécanisme de compétition inter-empire conduit, à terme, à l'effondrement de l'empire le plus faible, dont les colonies sont absorbées par l'empire le plus puissant.

### III.5.3.6. Finalisation

Cette étape consiste à répéter le processus décrit à l'étape 2 (assimilation, révolution, mise à jour des coûts, compétition) jusqu'à ce que les critères d'arrêt soient satisfaits. À ce stade, l'empire le plus puissant émerge comme dominant, marquant ainsi la convergence vers la solution optimale dans l'espace de recherche.

## III.5.4. Optimisation basée sur le comportement humain (HBBO)

HBBO est une méta-heuristique d'optimisation récemment proposée par Seyed-Alireza Ahmadi. Contrairement à de nombreuses approches classiques inspirées de phénomènes biologiques, animaux ou sociaux, le HBBO s'inspire du comportement humain dans sa quête de réussite. Dans une société, chaque individu poursuit des objectifs personnels distincts, et la

notion de succès varie selon les aspirations, les valeurs et les contextes. La réussite est ainsi évaluée en fonction du degré d'accomplissement de ces objectifs individuels. Étant donné que les êtres humains diffèrent dans leurs motivations et leurs perspectives, ils choisissent des voies variées pour atteindre leurs buts : études, carrières, spécialisations, etc. Une fois leurs objectifs personnels identifiés, les individus cherchent à développer leur expertise en apprenant, en expérimentant et en renforçant leurs compétences, dans le but d'optimiser leurs chances de succès.

Par ailleurs, chaque individu peut nourrir des passions ou intérêts personnels — tels que la musique, la peinture ou d'autres activités créatives — indépendamment de son domaine professionnel principal. En raison des conditions de vie changeantes et des expériences imprévues, une personne peut faire face à des obstacles professionnels, ou encore rencontrer des individus qui influencent ses décisions. Ainsi, les convictions, les objectifs et les points de vue d'un individu peuvent évoluer au fil du temps. Dans la quête d'une meilleure position sociale ou professionnelle, une personne peut décider de changer de domaine, souvent après avoir consulté des conseillers ou des experts, dans le but d'optimiser ses chances de succès et de développement personnel.

Pour modéliser ce mécanisme comportemental humain, l'algorithme HBBO s'appuie sur cinq phases principales : l'initialisation, l'éducation, la consultation, la probabilité de changement de domaine et la finalisation [102].

#### III.5.4.1. Initialisation

À l'instar de la plupart des algorithmes d'optimisation méta-heuristiques, HBBO débute par une phase d'initialisation. Au cours de cette étape, l'algorithme génère une population initiale d'individus, évalue leurs performances, puis les répartit dans différents domaines en fonction de leurs caractéristiques, comme l'illustre le schéma III.8.

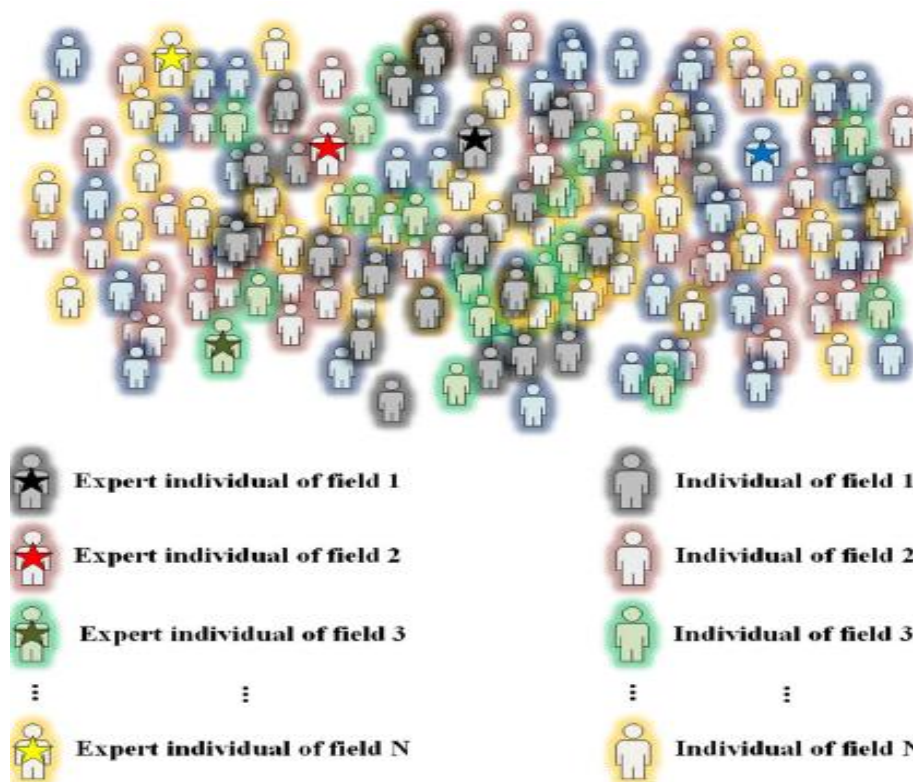


Figure III.8 Engager et diviser les peuples à travers les domaines initiaux [102].

Dans un problème d'optimisation avec  $N_{var}$  variables, une personne est exprimée par :

$$\text{people}=[x_1, x_2, x_3, \dots, x_{N_{var}}] \quad (\text{III.27})$$

L'algorithme utilise un ensemble de  $N_{pop}$  individus initiaux, qu'il répartit aléatoirement dans  $N_{field}$  domaines (ou champs) initiaux. Le nombre de personnes initiales dans chaque domaine est déterminé selon la relation suivante :

$$N.\text{Ind}_i=\text{round}\left\{\frac{N_{pop}}{N_{field}}\right\} \quad (\text{III.28})$$

Où  $N.\text{Ind}_i$  est le nombre de personnes initiales dans le  $i$ -ième champ. Après l'initialisation, les valeurs d'aptitude de chaque individu peuvent être évaluées par [102] :

$$\text{fitness value}=f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_{N_{var}}) \quad (\text{III.29})$$

### III.5.4.2. Education

Ce processus modélise la tendance des individus à se rapprocher de la personne ayant la meilleure performance dans leur domaine professionnel (ou champ). Cette performance est évaluée selon la nature du problème (s'il est question de minimisation ou maximisation). Pour représenter cette étape, un système de coordonnées sphériques est utilisé, où la meilleure personne (l'expert) de chaque domaine est placée à l'origine. Les autres individus convergent vers cet expert, et leurs positions sont mises à jour en fonction de cette référence, comme illustré dans la figure III.9. La position de chaque individu est ainsi délimitée par une sphère centrée autour de l'expert de son domaine, ce qui contraint le mouvement et la zone d'apprentissage locale.

Dans un schéma méta-heuristique comportant plus de trois variables de décision et utilisant les coordonnées d'un modèle sphérique dans un repère euclidien à plus de trois axes [103], la technique proposée détermine une coordonnée radiale aléatoire ( $r$ ) entre  $r_{min} = k_1d$  et  $r_{max} = k_2d$ , où  $d$  est la distance euclidienne entre l'expert et les personnes, et  $k_i$  est une constante qui sera fixée par un concepteur. En outre, la méta-heuristique proposée déterminera  $N-1$  coordonnées angulaires aléatoires ( $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_{N-1}$ ), où  $\theta_{N-1}$  sera déterminé entre 0 et  $2\pi$  radians et les autres angles seront trouvés entre 0 et  $\pi$  radians [102].

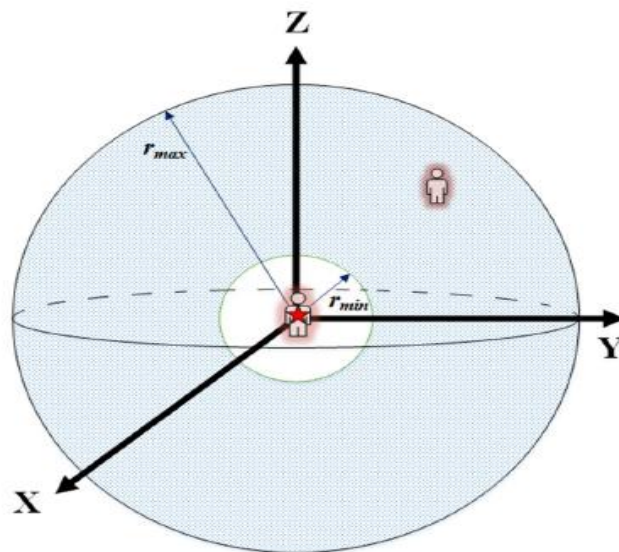


Figure III.9 L'éducation se déplace autour de l'expert [102].

### III.5.4.3. Consultation

Comme mentionné précédemment, chaque individu peut trouver aléatoirement un conseiller dans la société, susceptible de modifier sa perception ou sa stratégie. Cette phase de consultation est considérée comme efficace si le score de fitness du conseiller est meilleur que celui de l'individu consulté. Dans ce cas, le conseiller modifie certaines variables de l'individu, comme illustré dans la figure III.10. Si le conseiller ne présente pas une meilleure performance, aucune modification n'est apportée, ce qui signifie que la consultation a échoué. Le nombre de variables décisionnelles aléatoires susceptibles d'être remplacées lors d'une consultation réussie est déterminé par la relation suivante :

$$N_c = \text{round}(\sigma \cdot N_{\text{var}}) \quad (\text{III.29})$$

Où  $\sigma$  est la constante de consultation qui sélectionnera le nombre de variables aléatoires  $N_c$ , qui pourraient être remplacées dans cette étape [102].

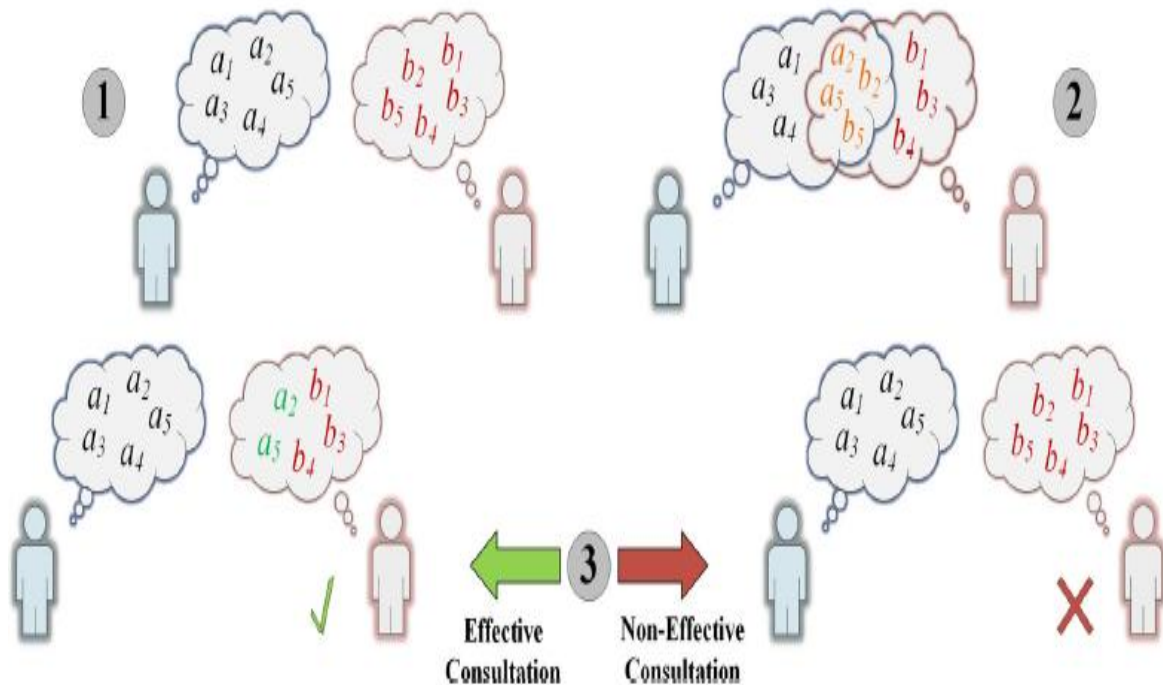


Figure III.10 Mécanisme de consultation [102].

### III.5.4.4. La probabilité de changement de domaine

Comme évoqué précédemment, un individu appartenant à un domaine donné peut décider de changer de domaine. Cette étape vise à calculer la probabilité de changement pour chaque domaine, en s'appuyant sur une méthode appelée probabilité de rang.

Pour ce faire, on commence par trier les domaines en fonction du score d'aptitude de leur meilleur individu, ce qui permet de classer les domaines du plus performant au moins performant.

$$\text{sort fields} = [\text{field}_1, \text{field}_2, \text{field}_3, \dots, \text{field}_N] \quad (\text{III.31})$$

Où la meilleure personne de  $\text{field}_1$  et  $\text{field}_N$  possède le score de fitness minimum et maximum des champs restants, respectivement. La probabilité de classement pour chaque domaine (champ) peut alors être obtenue par :

$$p_i = \frac{O_i}{N_{\text{field}}+1} \quad (\text{III.32})$$

Où  $p_i$  et  $O_i$  représentent respectivement la probabilité de classement et l'indice du  $i$ -ième domaine trié. En appliquant cette technique, le domaine dont la meilleure personne possède un score d'aptitude plus faible a moins de chances d'être changé, tandis que le domaine avec un score d'aptitude plus élevé est plus susceptible de voir un changement se produire. Ensuite, un nombre aléatoire compris entre 0 et 1 est généré ; en comparant ce nombre à la condition donnée dans l'équation suivante, on détermine si un individu de ce domaine changera effectivement de domaine :

$$\text{if rand} \leq p_i \rightarrow \text{field changing occurs} \quad (\text{III.33})$$

Dans cette étape, la probabilité de sélection de chaque personne est calculée à partir du score de fitness :

$$P.S_j = \left| \frac{f(\text{individual}_j)}{\sum_{k=1}^{N_{\text{ind}}} f(\text{individual}_k)} \right| \quad (\text{III.34})$$

Où  $P.S_j$  est la probabilité de sélection pour le  $j$ -ème individu et  $N_{\text{ind}}$  est le nombre de personnes dans le champ sélectionné. Enfin, en adoptant la technique de sélection de la roulette [102], une personne sera déterminée et ira dans un champ différent au hasard [102].

#### III.5.4.5. Finalisation

Après avoir réalisé les étapes précédentes, la valeur de la fonction d'aptitude de chaque individu est évaluée, puis l'algorithme répète ces processus jusqu'à ce que le nombre maximal d'itérations soit atteint [102].

### III.6. Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la présentation des méthodes fondamentales de l'intelligence artificielle, notamment les réseaux de neurones, la logique floue, les systèmes d'inférence neuro-flous adaptatifs ainsi que les algorithmes méta-heuristiques. L'objectif était de fournir un aperçu général et exhaustif des techniques couramment utilisées en IA pour résoudre des problèmes complexes d'ingénierie.

Dans le chapitre suivant, nous appliquerons une méthode hybride basée sur des techniques de gestion des risques, à savoir l'ADD (Arbre de Défaillance) et la FAHP (Fuzzy Analytic Hierarchy Process), afin de mener une étude qualitative sur le transport routier de matières dangereuses.

## **CHAPITRE IV**

### ***Approche intégrée pour l'évaluation du risque associé au TRMD***

## IV.1. Introduction

L'industrie chimique joue un rôle fondamental dans la chaîne d'approvisionnement, en fournissant d'innombrables matériaux essentiels, non seulement pour le bien-être public, mais aussi pour un large éventail de secteurs tels que la pharmacie, l'agriculture et l'industrie manufacturière. Sur le plan des infrastructures, le transport routier de ces produits constitue une composante essentielle de l'économie, en garantissant que ces substances atteignent leur destination de manière sûre et efficace. La gestion du transport de matières dangereuses, en particulier dans les zones urbaines, soulève des défis majeurs, tels que la modélisation des risques, la conception des réseaux, les systèmes d'aide à la décision, l'intégration entre localisation et routage, la localisation des installations, ainsi que les problèmes d'acheminement des véhicules. Parmi ces défis, l'évaluation des risques demeure une priorité [104-108].

En effet, les outils de gestion des risques sont essentiels à la mise en place de systèmes de transport sûrs et performants. La détermination de la probabilité d'incidents indésirables et l'évaluation de leurs conséquences négatives constituent des fonctions clés de la gestion des risques. L'identification, l'évaluation et l'analyse sont généralement considérées comme des étapes fondamentales de ce processus dans le transport routier [109-110]. Ainsi, plusieurs études notables ont été menées pour relever ces défis. Luan et al. [111] ont proposé une approche combinant des modèles de régression logistique et le diagramme de nœud papillon pour l'analyse des risques en temps réel dans le transport routier de matières inflammables. Huang et al. [112] ont développé un réseau bayésien couplé à une modélisation structurelle interprétative afin d'analyser les interactions entre les causes d'accidents et les facteurs de risque dans le transport ferroviaire de produits dangereux. Zarei et al. [113] ont proposé un réseau bayésien dynamique pour évaluer et analyser le risque évolutif des effets domino dans ce même contexte. Caliendo et Genovese [114] ont utilisé l'arbre d'événements pour analyser le risque lié au transport d'hydrogène liquide dans des tunnels autoroutiers unidirectionnels. Toutefois, l'évaluation quantitative de ces risques reste difficile en raison du manque de données disponibles.

Les méthodes de prise de décision multicritères (MCDM) constituent un outil fondamental pour résoudre les problèmes complexes évoqués précédemment. La MCDM permet d'évaluer diverses alternatives sur la base de plusieurs critères identifiés, facilitant ainsi une prise de décision rationnelle et structurée. Parmi ces méthodes, le processus de hiérarchie analytique (AHP) est largement reconnu et couramment utilisé pour résoudre divers problèmes d'ingénierie [115–119]. Dans ce contexte, plusieurs études pertinentes ont eu recours à la MCDM. Yilmaz et Verter [120] ont utilisé les méthodes AHP et TOPSIS pour la sélection d'itinéraires. Derse et al. [121] ont combiné l'arbre de défaillance avec le modèle TOPSIS afin d'évaluer les différents modes de transport de matières dangereuses et de déterminer le poids relatif de chaque mode. Gupta et al. [122] ont appliqué les méthodes AHP et DEA (Data Envelopment Analysis) pour développer un modèle d'optimisation multicritère dans le secteur du transport minier. Panchal et Shrivastava [123] ont utilisé la méthode AHP pour élaborer une carte des risques de glissements de terrain le long de la route nationale 5 (entre les kilomètres 197 600 et 283 200). Néanmoins, il demeure essentiel de tenir compte des ambiguïtés et des incertitudes, notamment lorsqu'il s'agit d'approches subjectives dans des contextes pratiques.

Par conséquent, la logique floue constitue une stratégie essentielle pour gérer les incertitudes et les ambiguïtés inhérentes aux systèmes complexes. À l'instar du raisonnement humain, elle exprime ces incertitudes à l'aide de variables linguistiques. La fuzzification, la base de règles et la défuzzification sont les principales étapes utilisées pour modéliser et approximer les problèmes réels [124–125]. Plusieurs études ont eu recours à la logique floue pour traiter les incertitudes dans le transport routier de produits dangereux. Huang et al. [126]

ont proposé une approche intégrée pour évaluer le risque d'incendie lors du transport et du stockage de batteries au lithium-ion. Leur méthode combine l'utilisation de l'arbre de défaillance pour identifier les événements élémentaires potentiels, avec l'application de la logique floue pour quantifier le risque associé à chaque chemin de défaillance. Ayyildiz et Taskin [127] ont identifié les critères de risque les plus critiques dans l'acheminement routier de matières dangereuses, et ont déterminé leurs poids respectifs à l'aide de la méthode AHP pythagoricienne floue. Koohathongsumrit et Meethom [128] ont quant à eux développé un système d'estimation des risques fondé sur la logique floue pour soutenir la sélection d'itinéraires dans des réseaux de transport multimodaux.

Motivé par la discussion précédente, ce document propose une méthode intégrée pour évaluer le risque lié au TRMD. Tout d'abord, un arbre de défaillance a été construit afin d'identifier l'ensemble des scénarios pouvant conduire à l'événement redouté. Des experts ont ensuite été sollicités pour estimer la probabilité d'occurrence des événements élémentaires identifiés, sous forme de nombres flous. Le poids de chaque avis a été déterminé à l'aide de la méthode AHP floue. Les valeurs obtenues ont ensuite été agrégées et converties en nombres numériques. La probabilité de chaque événement élémentaire a été calculée à l'aide de l'équation d'Onisawa, et celle de l'événement redouté a été déterminée via l'algèbre booléenne. Par ailleurs, la gravité de l'événement considéré a été évaluée à l'aide de la logique floue, en prenant en compte les caractéristiques du matériau transporté. Les résultats obtenus confirment que la méthode appliquée est efficace pour l'évaluation des risques liés au transport routier de matières dangereuses.

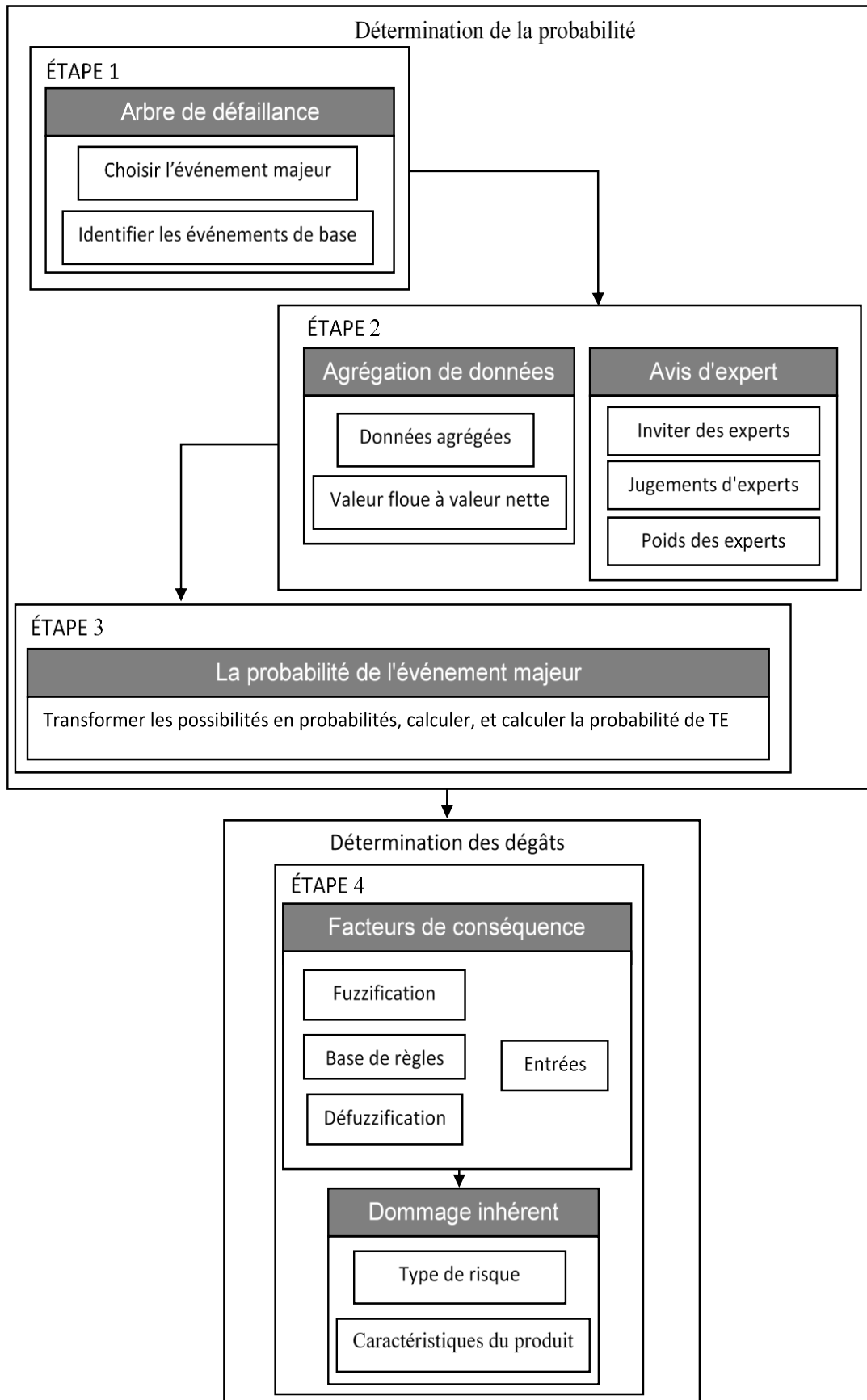
Le présent document est structuré comme suit : la sous-section 2 présente brièvement les méthodes utilisées ; la section 3 décrit le cadre méthodologique proposé ; la section 4 expose les résultats obtenus ainsi que leur analyse ; enfin, la section 5 conclut l'étude.

## IV.2. Méthodologie proposée

Le TRMD constitue un enjeu complexe qui requiert une planification rigoureuse ainsi que l'application de réglementations strictes afin de prévenir et de limiter les risques. Divers scénarios d'accident peuvent survenir en raison de combinaisons variées d'événements. Les dommages résultant de tels accidents peuvent entraîner de nombreuses conséquences, notamment la dégradation de l'environnement, la perte de vies humaines et de biens, des pertes financières importantes, ainsi qu'une instabilité sociale. De manière générale, le risque est évalué en fonction de la probabilité d'occurrence d'événements indésirables et de leurs conséquences respectives.

$$R=P \times G \tag{IV.1}$$

À cet égard, la présente étude propose un cadre intégré reposant sur l'AHP flou, l'analyse d'arbre de défaillance flou, ainsi qu'un système d'inférence floue. Le schéma général de la méthodologie est présenté à la figure IV.1. L'objectif principal est de calculer la probabilité et la gravité associées au transport routier de matières dangereuses. La méthodologie proposée se compose de deux phases principales : le calcul de la probabilité et celui de la gravité. Tous les aspects liés à ces deux dimensions sont détaillés dans les sous-sections suivantes.



FigureIV.1 Architecture du modèle proposé.

### IV.2.1. Détermination de la probabilité

Il est essentiel que les évaluateurs s'appuient sur l'expertise d'acteurs spécialisés lorsqu'ils mènent des processus d'évaluation des risques dans des contextes spécifiques, en particulier en cas de données insuffisantes ou indisponibles. La méthodologie du modèle proposé pour le calcul des probabilités repose sur l'utilisation conjointe de la théorie des ensembles flous et de techniques qualitatives. En d'autres termes, les caractéristiques quantifiables des événements identifiés dans l'arbre de défaillance sont combinées avec les jugements d'experts afin d'estimer leur probabilité d'occurrence.

Comme illustré à la figure IV.2, un événement redouté est d'abord sélectionné, puis un arbre de défaillance est construit afin d'identifier un ensemble d'événements élémentaires (BE). Les avis d'experts sont ensuite recueillis pour estimer la probabilité de défaillance de ces événements. Le modèle proposé repose sur trois éléments clés : l'agrégation floue des données, la pondération des experts à l'aide de la méthode AHP floue, et la conversion des degrés de possibilité en probabilités. Tous les détails relatifs à l'agrégation des données sont développés dans la sous-section 3.1.

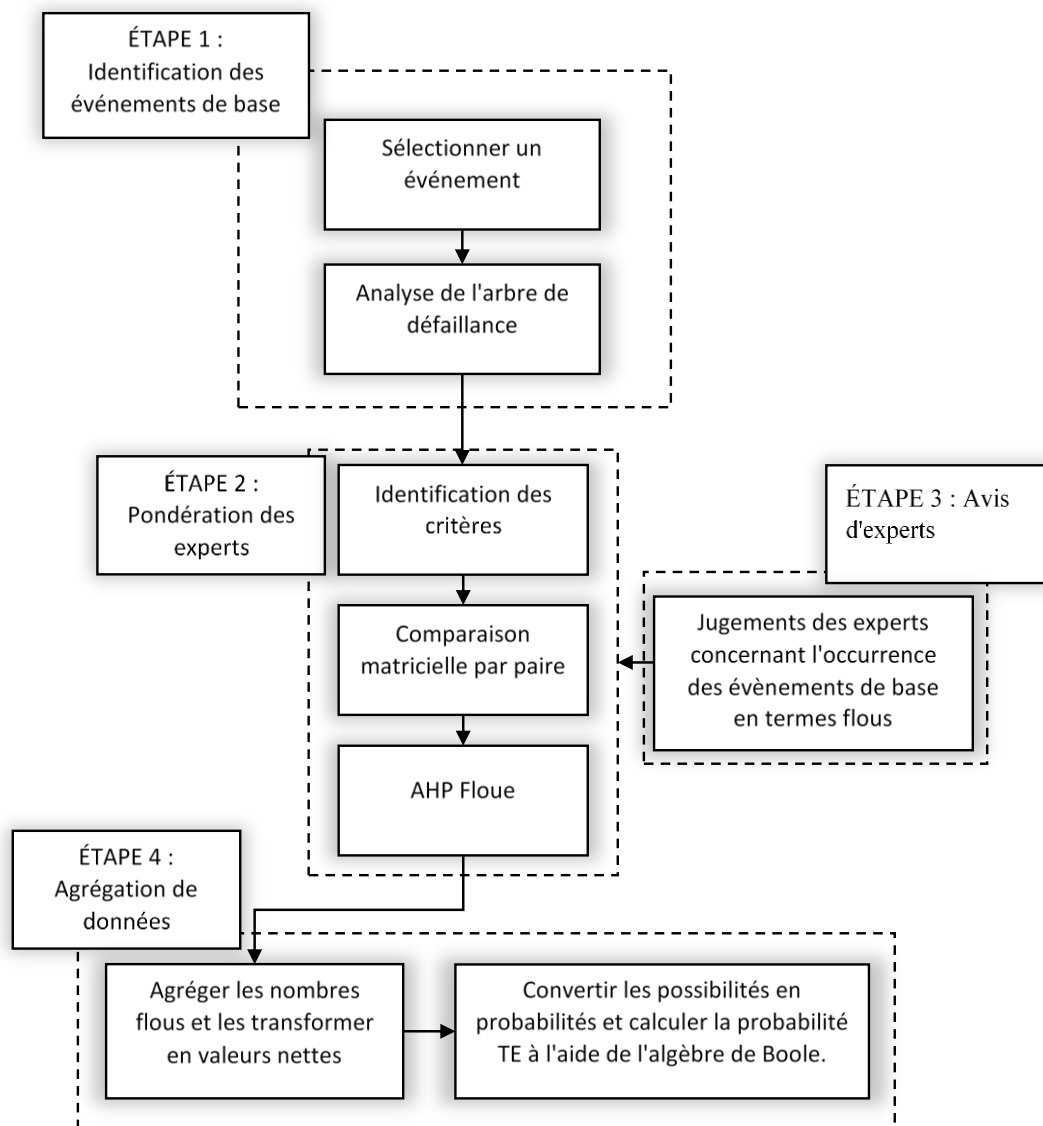


Figure IV.2 Le modèle proposé pour la détermination des probabilités.

### IV.2.1.1. Agrégation des données

Dans le processus de prise de décision, l'implication d'experts est indispensable. Il est donc important de considérer à la fois des groupes d'experts homogènes et hétérogènes [129]. Les groupes homogènes sont composés uniquement de travailleurs, tandis que les groupes hétérogènes rassemblent à la fois des spécialistes et des travailleurs. Dans ce contexte, la constitution d'une équipe d'experts peut s'avérer complexe ; néanmoins, il a été démontré que l'utilisation de groupes hétérogènes est généralement plus efficace pour la prise de décision que celle de groupes homogènes. C'est pourquoi, dans cette étude, un groupe hétérogène d'experts, possédant une solide expérience dans le domaine du transport de matières dangereuses, a été retenu.

En effet, selon la formation et les connaissances des experts, les groupes hétérogènes se voient attribuer des poids différents. Afin d'éviter les erreurs pouvant découler d'une confiance excessive accordée à un seul expert, il est essentiel de déterminer le poids de chaque expert en tenant compte de plusieurs critères. Dans ce cadre, les experts sont invités à exprimer qualitativement leur jugement concernant la probabilité d'occurrence de chaque événement de base. Trois critères généralement reconnus (l'expérience, l'âge et le niveau d'instruction) sont considérés nécessaires pour calculer ces pondérations. Par ailleurs, dans le cadre de cette étude, la position professionnelle de chaque expert est également prise en compte comme un facteur déterminant supplémentaire, en complément des critères mentionnés (voir figure IV.3). L'inclusion de ce critère vise à atténuer les biais cognitifs susceptibles de provenir d'experts instruits mais manquant d'expérience pratique. La méthode AHP floue est ensuite utilisée pour calculer le poids relatif de chaque expert.

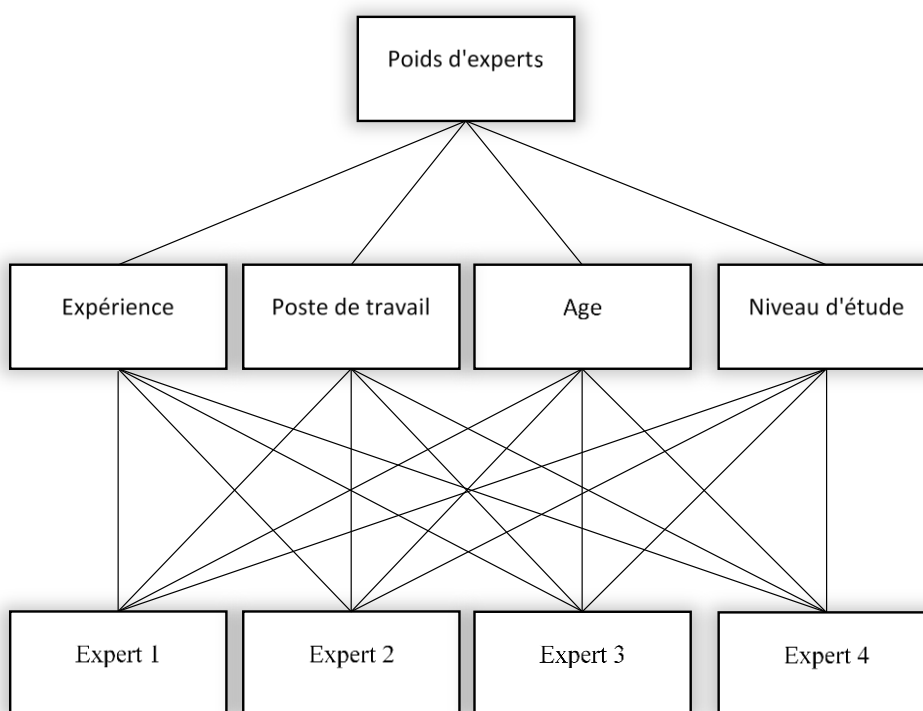


Figure IV.3 AHP floue pour la pondération des experts.

Soit  $\tilde{A}_1 = (c_{11}, c_{12}, c_{13})$  et  $\tilde{A}_2 = (c_{11}, c_{12}, c_{13}, c_{14})$  les nombres flous triangulaires et trapézoïdaux sélectionnés par le premier expert. La fonction d'appartenance peut être donnée comme suit :

Pour la fonction d'appartenance triangulaire :

$$f_{\tilde{A}_1}(x) = \begin{cases} \frac{(x-c_{11})}{(c_{12}-c_{11})}, & c_{11} \leq x \leq c_{12} \\ \frac{(c_{13}-x)}{(c_{13}-c_{12})}, & c_{12} \leq x \leq c_{13} \\ 0, & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (IV.2)$$

Pour la fonction d'appartenance trapézoïdale :

$$f_{\tilde{A}_2}(x) = \begin{cases} \frac{(x-c_{11})}{(c_{12}-c_{11})}, & c_{11} \leq x \leq c_{12} \\ 1, & c_{12} \leq x \leq c_{13} \\ \frac{(c_{14}-x)}{(c_{14}-c_{13})}, & c_{13} \leq x \leq c_{14} \\ 0, & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (IV.3)$$

Où  $c_{12}$ ,  $c_{13}$ ,  $c_{11}$ , et  $c_{14}$  sont respectivement le centre droit, le centre gauche, la droite, et le côté gauche du nombre flou,  $x$  désigne la variable floue,  $f_{\tilde{A}_1}$  et  $f_{\tilde{A}_2}$  représentent la fonction floue.

L'importance de chaque critère est déterminée à l'aide d'une matrice de comparaison, comme expliqué dans la sous-section 2.3 et représenté dans l'équation 1. Les comparaisons par paire sont effectuées à l'aide d'ensembles triangulaires flous. Les ensembles triangulaires correspondants pour les termes quantifiés sont présentés dans le tableau IV.1, indiquant l'importance relative entre l' $i$ -ème et le  $j$ -ème critère.  $\check{9}^{-1}$ ,  $\tilde{1}$  et  $\check{9}^1$  représentent respectivement les termes triangulaires flous les moins importants, moyens et les plus importants dans les comparaisons par paires. La méthode de pondération des experts est basée sur le jugement humain, comme indiqué dans la sous-section 3.1.

Jusqu'à présent, la capacité (poids) de chaque expert a été déterminée de manière réaliste. Lin et Wang [130] ont démontré que le jugement qualitatif peut être utilisé pour estimer la probabilité des événements de base identifiés dans l'arbre de défaillance. Ils ont proposé l'utilisation d'ensembles flous triangulaires et trapézoïdaux, tels qu'illustrés dans les équations IV.6 et IV.7. Les valeurs qualitatives présentées dans le tableau IV.1 sont appliquées dans la présente étude.

Table IV.1 Termes qualitatifs et ensembles flous.

Terme qualitatif	Nombre flou
Très faible (VL)	(0,0.1, 0.2)
Relativement faible (RL)	(0.1, 0.2, 0.3)
Faible (L)	(0.2, 0.3, 0.4, 0.5)
Moyen (M)	(0.4, 0.5, 0.6)
Élevée (H)	(0.5, 0.6, 0.7, 0.8)
Relativement élevé (RH)	(0.7, 0.8, 0.9)

---

Très élevé (VH)      (0.8, 0.9, 1)

---

Conformément aux poids des experts, la technique d'agrégation est fournie par l'équation IV.4 comme suit [131] :

$$\tilde{A}_{\text{aggregated}} = \sum_{m=1}^M W_m \times \tilde{A}_m \quad (\text{IV.4})$$

Où  $\tilde{A}_m$  représente le jugement de l'expert en termes de nombre flou indiquant la probabilité floue des événements de bases dans l'arbre de défaillance,  $\tilde{A}_{\text{aggregated}}$  est la valeur agrégée du nombre flou,  $m$  désigne le nombre d'experts et  $W_m$  indique le poids de l'expert.

Pour plus de détails concernant le calcul de  $W_m$  et  $\tilde{A}_m$ , veuillez-vous référer à [132-133].

Ensuite, les nombres flous  $\tilde{A}_m$  pour  $\tilde{A}_1$  et  $\tilde{A}_2$  sont agrégés comme suit :

$$\tilde{A}_W = (W_1 c_{11} + W_2 c_{12} + W_3 c_{13} + W_4 c_{14}) \quad (\text{IV.5})$$

La possibilité de chaque événement de base, fondée sur l'opinion agrégée, est calculée à l'aide de la méthode du centre de gravité (CoA). Le résultat brut de l'ensemble flou est donné par l'équation IV.6.

$$X = \frac{\int h(x) \cdot x \, dx}{\int h(x) \, dx} \quad (\text{IV.6})$$

Où  $h(x)$  indique la fonction d'appartenance agrégée,  $x$  représente la variable de sortie et  $X$  est la valeur brute.

Onisawa [134] a démontré que la valeur obtenue par la méthode du centre de gravité (CoA) correspond à un degré de possibilité plutôt qu'à une probabilité. Par conséquent, l'équation IV.7 est introduite pour convertir cette valeur de possibilité en probabilité.

$$p = \begin{cases} \frac{1}{10^k} & \text{crisp possibility} \neq 0 \\ 0 & \text{crisp possibility} = 0 \end{cases}, K = \left\{ \left( \frac{1}{\text{crisp value}} - 1 \right) \right\}^{1/3} * 2.301 \quad (\text{IV.7})$$

Où  $p$  est la probabilité de l'évènement de base et  $k$  représente un nombre de coefficient.

Enfin, la probabilité de chaque événement de base, déterminée à partir des jugements des experts, ainsi que la probabilité de l'évènement indésirable, calculée à l'aide de l'algèbre de Boole, sont estimées.

### IV.2.2. Détermination de la gravité

La mesure de la gravité vise à quantifier l'intensité des dommages engendrés par la survenue d'un événement indésirable. Planas et al. [135] ont proposé un indice de gravité spécifique à chaque phénomène dangereux. Selon [135], le taux de gravité correspond à une valeur quantitative exprimant la sévérité d'un accident. En général, ce calcul attribue des seuils limites aux effets potentiels tels que (le nuage toxique, le rayonnement thermique et l'explosion) lesquels doivent être évalués à une distance donnée pour chaque type d'évènement (dispersion de substances toxiques, incendie, explosion). Toutefois, le modèle proposé demeure complexe et requiert des données précises ainsi qu'une expertise approfondie.

Selon Martínez-Alegría et al. [136], l'intensité de la gravité dans le transport de matières dangereuses dépend de plusieurs facteurs, notamment le type d'accident (fuite de substances, explosion, incendie), la nature des substances transportées et le lieu où se produit l'accident. La méthode qu'ils proposent se révèle plus simple et plus pratique pour l'évaluation du risque.

En tenant compte du type de danger, de la nature du bien transporté et du lieu de l'accident, la gravité peut être estimée à l'aide de l'équation IV.8.

$$G = G_A \times G_{TM} \times CF \quad (IV.8)$$

Où  $G_A$  représente le danger lié au type d'accident (voir tableau IV.2),  $G_{TM}$  désigne le dommage inhérent aux substances et CF indique le facteur conséquent. La figure IV.4 présente un diagramme de la détermination de la gravité.

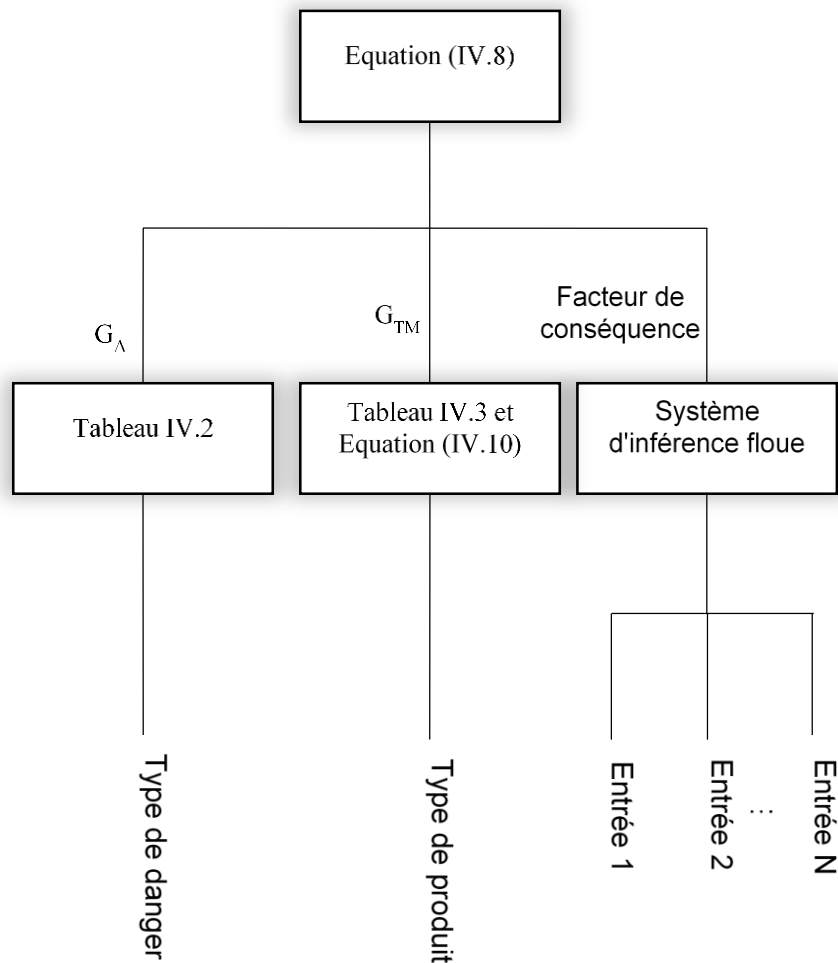


Figure IV.4 Le cadre proposé pour le calcul de la gravité.

Tableau IV.2 Valeurs attribuées aux dangers en fonction du type d'accident [137].

Valeurs attribuées	Valeurs normalisées	Types de dangers
1	0.17	Un incident a interrompu la progression du véhicule, toutefois le conteneur est resté intact et n'a subi aucun dommage.
2	0.33	Le récipient présente des dommages mineurs, mais aucune fuite du produit n'est observée.
4	0.67	Le conteneur présente une rupture d'intégrité, entraînant une fuite de la substance transportée.
6	1	Le conteneur a été endommagé, et la substance déversée a pris feu.
6	1	Explosion du matériau

#### IV.2.2.1. Détermination du dommage inhérent

Comme mentionné par [137], le type de substance transportée constitue l'un des facteurs les plus déterminants dans le calcul du risque. Martínez-Alegría et al. [136] introduisent un indicateur de type de dommage associé à la matière transportée, noté ( $G_{TM}$ ), calculé à partir de sa classification. Cette approche s'avère particulièrement efficace, car elle établit un lien direct entre les dommages potentiels et les propriétés intrinsèques des produits (corrosivité, toxicité, inflammabilité, etc.). Ainsi, le dommage inhérent à la substance transportée est déterminé à l'aide de l'équation IV.9.

$$G_{TM} = \frac{G_I + G_R + G_T}{3} + G_{GO} \quad (IV.9)$$

Où  $G_I$  indique l'inflammabilité du produit,  $G_R$  représente la réactivité du produit,  $G_T$  est la corrosion/toxicité de la substance et  $G_{GO}$  dénote l'oxydation. Le tableau IV.3 répertorie les dangers associé à la matière transportée.

Les indices  $G_I$ ,  $G_R$ ,  $G_T$  et  $G_{GO}$  sont déterminés en fonction des caractéristiques du matériel transporté. Ces indices vont de 0 à 4, indiquant la gravité des dommages du plus faible au plus élevé, comme le montre le tableau IV.3.  $G_{GO}$  reçoit la valeur 1 si la matière transportée est capable de libérer de l'oxygène ; dans le cas contraire, il reçoit la valeur 0.

Tableau IV.3 Dangers des produits chimiques [136].

Inflammabilité	$G_I$	Toxicité	$G_T$	Réactivité	$G_R$	Oxydation	$G_{GO}$
Ininflammable : substance qui ne s'enflamme pas et ne soutient pas la combustion dans des conditions normales.	0	Risque négligeable	0	Ne réagit pas	0	Non inflammable ou présentant une teneur modérée en oxygène, susceptible de favoriser l'inflammation de matériaux	0

Peut s'enflammer au contact d'autres substances combustibles et/ou générer des gaz inflammables lors de réactions chimiques.	1	Risques liés aux fumées et vapeurs émises lors de la décomposition du matériau. Ce groupe inclut également les substances faiblement radioactives.	1	Initialement stable, la substance devient volatile sous l'effet de la chaleur. Les conteneurs peuvent alors éclater en raison de l'augmentation de la pression interne.	1	combustibles à proximité Hautement réactif : réagit de façon violente ou explosive au contact de divers matériaux.	1
Nécessite un préchauffage pour s'enflammer, peut couvrir sans s'enflammer facilement.	2	Modérément dangereux : provoque des brûlures et des irritations. Inclut des matières radioactives présentant des niveaux de radiation moyens.	2	Potentiel de réactions chimiques violentes à haute température. Le polymère peut subir une polymérisation explosive sous l'effet de la chaleur.	2		
Peut s'enflammer au contact de l'air ou de l'humidité et/ou brûler rapidement.	3	Très dangereux : peut provoquer des blessures graves. Comprend des matières radioactives présentant des niveaux de radiation élevés.	3	Réagit de manière explosive aux sources d'inflammation, aux températures élevées, à la surchauffe et à la friction. Explose au contact de l'eau et des substances inflammables.	3		
Extrêmement inflammable : gaz, solides et liquides hautement inflammables, incluant les matières pyrophoriques	4	Létales et hautement toxiques : substances susceptibles de causer la mort.	4	Peut exploser dans des conditions normales, présentant un risque d'explosion massive. Comprend des matières formant des mélanges explosifs avec l'air.	4		

Pour normaliser la valeur du dommage associé à la matière transportée dans une plage comprise entre 0 et 1, l'équation (IV.9) est multipliée par 0,2, puisque 5 correspond à sa valeur maximale. Ainsi, la nouvelle expression de l'endommagement inhérent s'écrit comme suit :

$$G_{TM} = \left( \frac{G_I + G_R + G_T}{3} + G_{GO} \right) \otimes 0.2 \quad (\text{IV.10})$$

#### IV.2.2.2. Détermination du CF

L'intensité des accidents dans les zones urbaines ne peut être assimilée à celle observée dans des zones moins densément peuplées. En effet, plus un lieu est sensible — en raison de sa

proximité avec des zones résidentielles, d'une forte densité de population ou d'un grand nombre de points critiques — plus la gravité potentielle des accidents augmente. Pour tenir compte de cette variabilité, un nouveau paramètre, noté CF, a été introduit dans la formule originale du risque. Ce coefficient influe directement sur la gravité, augmentant ainsi sa valeur selon les caractéristiques spécifiques du lieu. Afin d'estimer ce coefficient, un système flou de type Takagi-Sugeno, avec une sortie numérique, a été conçu. Le CF est calculé pour normaliser la gravité en fonction des caractéristiques de la zone étudiée, en tenant compte de trois données clés : la distance entre le lieu de l'accident et le bâtiment le plus proche, La densité moyenne de population dans un rayon de 2 500 m<sup>2</sup>, déterminée à l'aide d'un questionnaire standard et Le nombre de zones sensibles présentes dans la zone de contrôle, évalué grâce aux connaissances des travailleurs. La figure IV.5 illustre la structure principale du cadre proposé pour le calcul du niveau de gravité, intégrant ce coefficient.

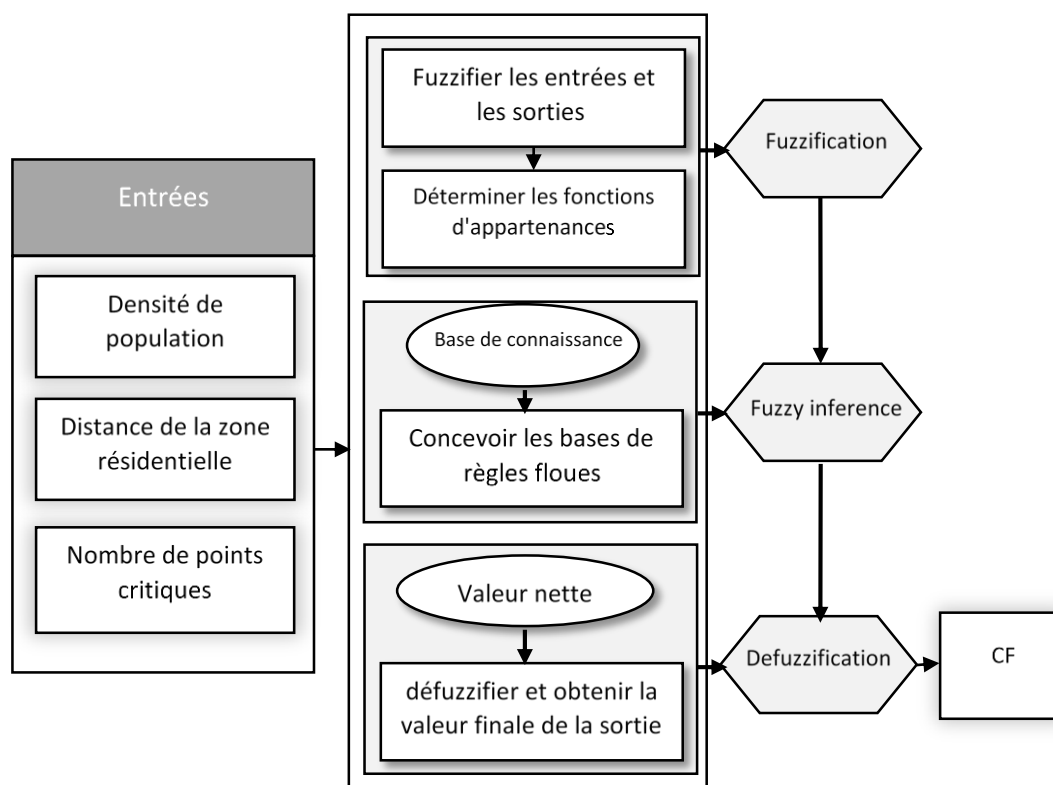


Figure IV.5 Système d'inférence floue pour le calcul des CF.

### IV.3. Résultats

#### IV.3.1. Détermination des probabilités

Afin de valider la méthodologie proposée, les données utilisées dans cette étude proviennent de NAFTAL (Société nationale de commercialisation et de distribution des produits pétroliers et gaziers). NAFTAL est reconnue comme la plus grande et la plus prometteuse entreprise de commercialisation et de distribution de gaz et de produits pétroliers en Algérie. Sa mission principale est d'assurer le transport routier de gaz et de pétrole à travers toutes les villes du pays. L'analyse des défaillances liées au transport routier de matières dangereuses a été effectuée en appliquant la méthode de l'arbre de défaillance floue. L'événement indésirable retenu pour cette analyse est le « déversement de matières ». Les résultats obtenus sont présentés aux figures IV.6.a et IV.6.b.

Les résultats de l'analyse de l'arbre de défaillance ont révélé que l'accident de circulation, la sous pression et la fissure du réservoir du véhicule constituent les principales causes directes du rejet de matières. La méthode d'analyse développée comprend 11 EIs et 27 EBs. Ces événements de base ont été identifiés en reliant les causes contribuant à la défaillance du transport routier de matières dangereuses aux événements intermédiaires correspondants. Les connexions entre ces attributs contributifs sont modélisées à l'aide de portes logiques OU, ce qui signifie que la survenue de l'un quelconque de ces événements peut entraîner la libération de substances dangereuses. Par ailleurs, dans cette étude, les probabilités des événements de base, exprimées selon les opinions des experts à l'aide de deux échelles qualitatives et leurs nombres flous associés (présentés à la figure IV.7), sont reportées dans le tableau IV.4. Un groupe hétérogène de quatre experts a été pondéré en fonction de quatre critères : la position professionnelle, l'expérience, l'âge et le niveau d'éducation. Les détails relatifs à chaque expert sont fournis dans le tableau IV.5.

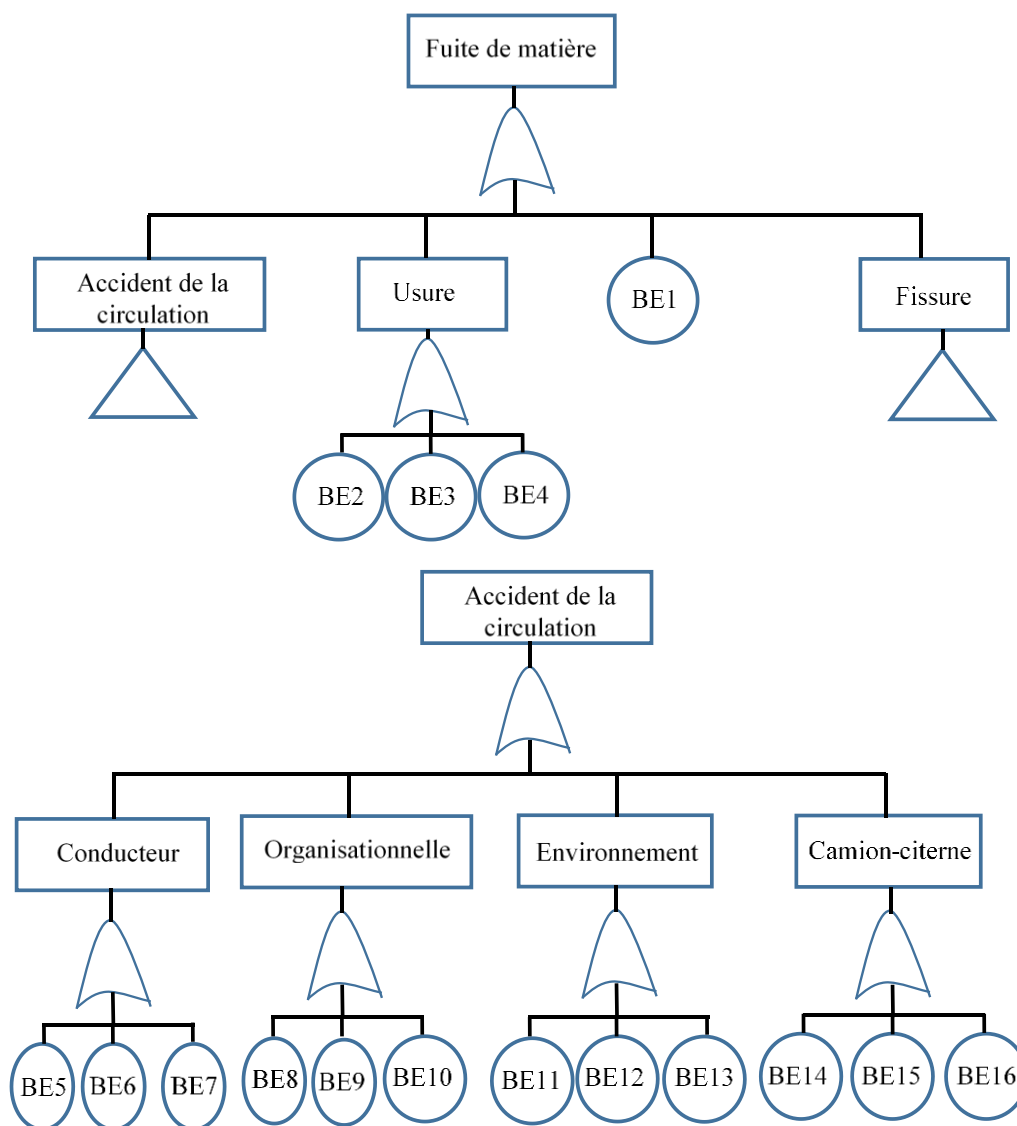


Figure IV.6.a. Diagramme FTA de la libération de produits chimiques.

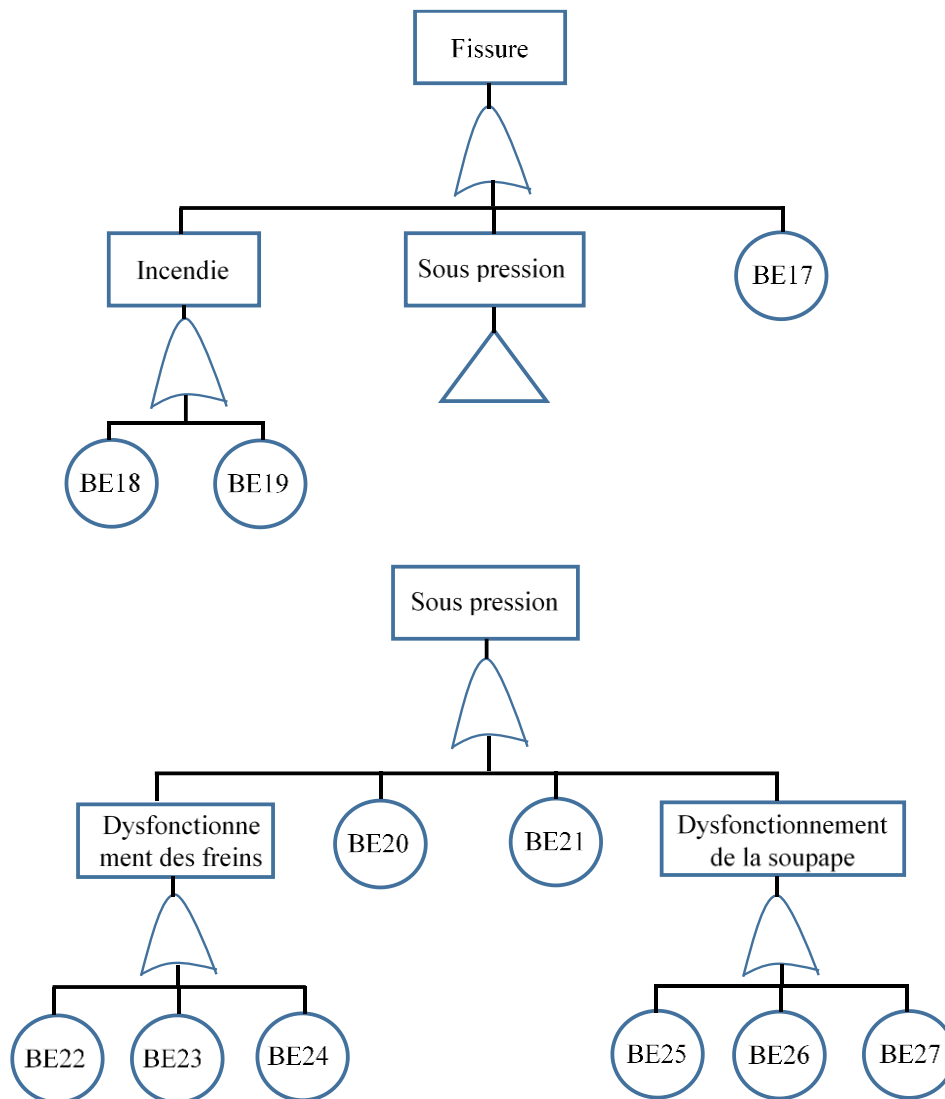


Figure IV.6.b Diagramme FTA de la libération de produits chimiques.

Tableau IV.4 Evènements de base identifiés et jugements des experts concernant leurs possibilités.

Étiquette de référence	Événement de base	Jugement d'expert			
		Expert 1	Expert 2	Expert 3	Expert 4
BE1	Collision avec un tiers	H	RH	RL	VL
BE 2	Température élevée	L	RH	L	M
BE 3	Usage répétitif	L	RH	L	L
BE 4	Autres	L	VH	RL	RL
BE 5	Fatigue	H	VH	RL	VL
BE 6	Non-respect des instructions	H	RH	L	L
BE 7	Autres	L	M	RL	RL
BE 8	Surcharge	RL	M	VL	RL
BE 9	Contraintes économiques	RH	H	RL	RL
BE 10	Autre	L	M	RL	RL

BE 11	Mauvaises conditions météorologiques	H	RH	VL	VL
BE 12	Mauvaise route	RH	VH	VL	VL
BE 13	Autre	L	RH	RL	VL
BE 14	Éclatement des pneus	H	H	VL	VL
BE 15	Verrouillage du guidage de la voiture	VL	H	VL	VL
BE 16	Autres	L	RH	RL	VL
BE 17	Effet des missiles	VL	RL	VL	VL
BE 18	Zone industrielle	VH	VH	VL	VL
BE 19	Feu de jardin	L	RH	VL	VL
BE 20	Débordement	VL	M	VL	L
BE 21	Extincteur égaré	H	RH	VL	VL
BE 22	Mauvais entretien	H	RH	L	VL
BE 23	Mauvaise qualité	H	RH	L	VL
BE 24	Autres	H	RH	VL	VL
BE 25	Entretien inadéquat	H	RH	RL	RL
BE 26	Mauvaise qualité	H	RH	RL	RL
BE 27	Autres	H	H	RL	VL

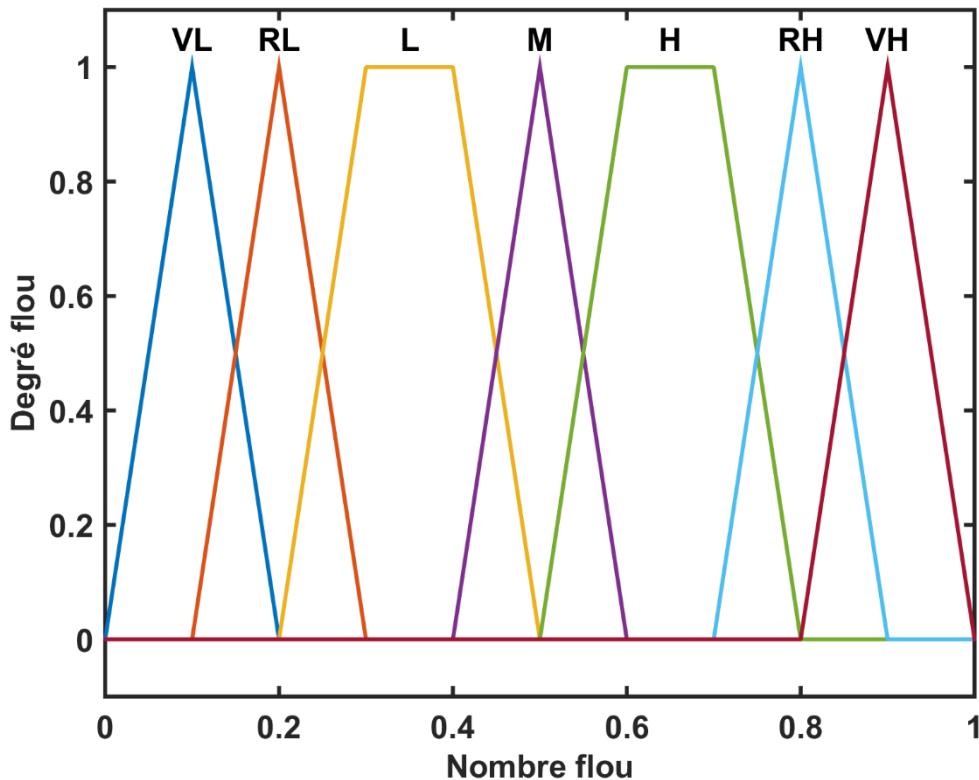


Figure IV.7 Nombre flou correspondant aux possibilités des événements de base.

Tableau IV.5 Informations sur les experts.

Experts	Poste de travail	Expérience	Niveau d'éducation	Age	Poids
Expert 1	Technicien	6	Master	34	0.196
Expert 2	Ingénieur	11	Master	38	0.227
Expert 3	Ingénieur	7-8	Master	36	0.27
Expert 4	Ingénieur	32	Mastère spécialisé	50	0.306

Pour déterminer le poids de chaque expert, conformément à la figure IV.7, quatre spécialistes aux profils variés ont été sollicités. Des questionnaires ont été distribués afin de recueillir leurs évaluations. Les réponses obtenues ont ensuite été converties en nombres flous triangulaires, tels que présentés dans le tableau IV.1. Pour chaque critère retenu (position professionnelle, expérience, âge, niveau d'instruction), des matrices de comparaison par paires ont été établies. Ces matrices ont permis de structurer les jugements des experts concernant l'importance relative des critères. Enfin, à l'aide de l'approche AHP floue, telle que décrite dans la sous-section 2.3, les poids individuels des experts ont été calculés. Les résultats finaux sont présentés dans le tableau IV.5.

L'étape suivante consiste à agréger les jugements des experts pour chacun des événements de base, en tenant compte des poids qui leur ont été attribués. Comme mentionné précédemment, quatre experts ont été invités à évaluer la possibilité d'occurrence de chaque événement de base à l'aide d'échelles qualitatives, telles que présentées dans le tableau IV.4. L'équation IV.8 est utilisée pour obtenir le nombre flou agrégé correspondant à chaque événement de base. Par la suite, la méthode du centre de gravité (CoA) est appliquée afin de calculer la valeur nette de chaque ensemble flou agrégé. Enfin, l'équation proposée par Onisawa [37] est utilisée pour convertir la possibilité calculée par CoA en une probabilité correspondante pour chaque événement de base. Les résultats détaillés de ces calculs sont présentés dans le tableau IV.6.

Tableau IV.6. Valeurs agrégées des événements de base.

Étiquette de référence	Agrégation de chaque subjective des événements de base	Déffuzification subjective de l'évènement de base	Probabilité de l'évènement de base
BE 1	(0,284 0,384 0,404 0,504)	0,393925	0,00220616
BE 2	(0,375 0,475 0,522 0,622)	0,4982	0,00493709
BE 3	(0,314 0,414 0,491 0,591)	0,45224	0,00352556
BE 4	(0,279 0,379 0,398 0,498)	0,388455	0,00210485
BE 5	(0,307 0,407 0,426 0,526)	0,416645	0,00266576
BE 6	(0,372 0,472 0,55 0,65)	0,51107	0,00540404
BE 7	(0,215 0,315 0,361 0,461)	0,33812	0,00132309
BE 8	(0,141 0,241 0,241 0,341)	0,24113	0,00042461

BE 9	(0,309 0,409 0,431 0,531)	0,4199	0,00273699
BE 10	(0,188 0,288 0,307 0,407)	0,297575	0,00086351
BE 11	(0,257 0,357 0,377 0,477)	0,366895	0,00173817
BE 12	(0,319 0,419 0,419 0,519)	0,41903	0,00271781
BE 13	(0,225 0,325 0,345 0,445)	0,335095	0,00128399
BE 14	(0,212 0,312 0,354 0,454)	0,332815	0,00125506
BE 15	(0,114 0,214 0,236 0,336)	0,22496	0,00033475
BE 16	(0,225 0,325 0,345 0,445)	0,335095	0,00128399
BE 17	(0,023 0,123 0,123 0,223)	0,12272	3,69E-05
BE 18	(0,339 0,439 0,439 0,539)	0,43864	0,00317539
BE 19	(0,198 0,298 0,318 0,418)	0,308065	0,0009696
BE 20	(0,152 0,252 0,283 0,383)	0,26748	0,00060355
BE 21	(0,257 0,357 0,377 0,477)	0,366895	0,00173817
BE 22	(0,311 0,411 0,458 0,558)	0,43447	0,00307355
BE 23	(0,311 0,411 0,458 0,558)	0,43447	0,00307355
BE 24	(0,265 0,365 0,365 0,465)	0,36451	0,00170066
BE 25	(0,315 0,415 0,434 0,534)	0,424565	0,00284156
BE 26	(0,315 0,415 0,434 0,534)	0,424565	0,00284156
BE 27	(0,255 0,355 0,355 0,455)	0,35518	0,00155945

Enfin, en appliquant la théorie des probabilités combinée à l'algèbre booléenne, la probabilité de survenue de l'événement indésirable a été estimée à 0,054. Comme mentionné précédemment, ce résultat sera utilisé dans la suite de l'étude pour évaluer le risque associé à la libération de la matière dangereuse.

### IV.3.2 Détermination du risque

Les efforts déployés dans cette section ont été axés sur l'estimation de l'indice de risque pour le transport routier de marchandises dangereuses. Par conséquent, un système flou basé sur le type Takagi-Sugeno a été conçu pour calculer le coefficient CF. Trois entrées, à savoir le "nombre de points critiques", "distance par rapport de la zone résidentielle" et la "densité de population", ont été prises en compte. Des fonctions d'appartenance triangulaires, trapézoïdales et gaussiennes ont été attribuées aux entrées floues, et des valeurs constantes ont été déterminées pour la sortie (voir figure IV.8). En outre, 125 règles ont été élaborées pour rendre le système flou opérationnel (eg., si nombre de points critiques et VL, distance par rapport de la zone résidentielle est VH et densité de population est VL alors CF est VL), ce qui a permis

de calculer le CF à l'aide de l'équation (IV.11). La figure IV.9 illustre le coefficient CF en fonction de la distance.

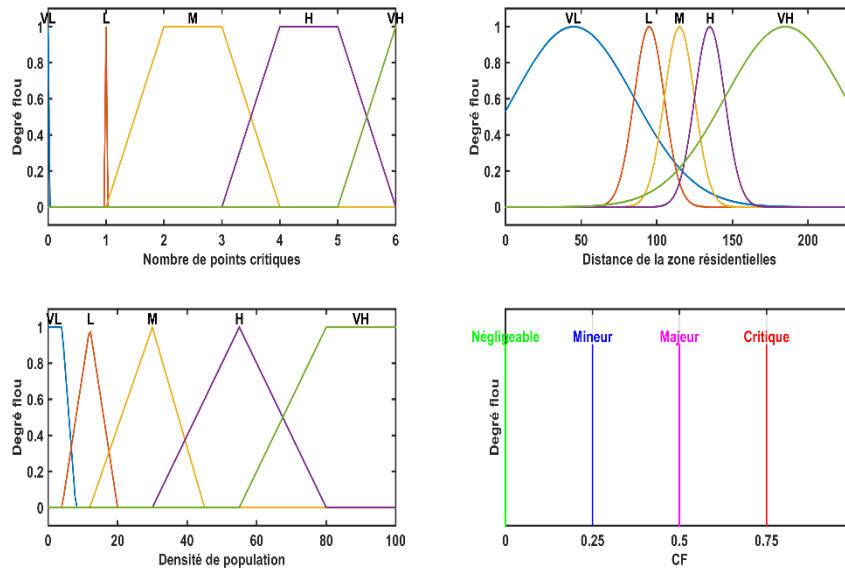


Figure IV.8 Fonction d'appartenance pour les entrées et la CF.

$$CF = \frac{\sum_{i=1}^r \alpha_i y_i}{\sum_{i=1}^r \alpha_i} \quad (IV.11)$$

Où  $r = 1, 2, \dots, 125$  indique les règles activées,  $\alpha_i$  est le niveau d'activation de la  $i$ ème règle et  $y_i$  est la sortie.

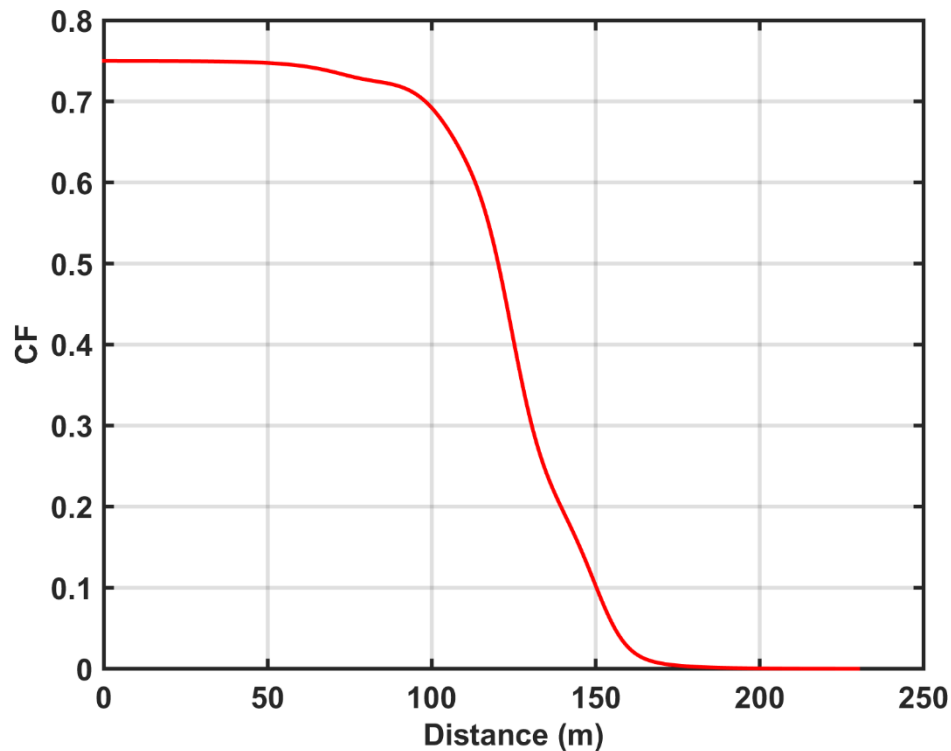


Figure IV.9 Facteur de conséquence de la libération de produit chimique.

La figure IV.9 illustre l'évolution de la valeur du coefficient CF en fonction de la distance par rapport au point de fuite. On observe que le CF reste élevé jusqu'à environ 100 mètres, traduisant une vulnérabilité accrue des populations proches du site de l'accident. Au-delà de cette distance, le CF diminue progressivement pour atteindre une valeur proche de zéro aux alentours de 175 mètres, ce qui indique une réduction significative du risque pour les zones plus éloignées.

Dans cette étude, le produit retenu pour l'évaluation du risque est l'éthanol, en raison de son volume de transport le plus élevé selon les données disponibles. Le scénario considéré implique une fuite de matériau, identifiée comme l'un des types d'accidents les plus critiques. Ainsi, conformément à l'équation (10) et aux données du tableau IV.2, la valeur maximale des dommages inhérents pour l'éthanol est fixée à 1, tandis que la valeur normalisée du type d'accident est de 0,67. En intégrant les résultats obtenus pour la probabilité d'occurrence, le coefficient de correction CF, le type de danger et les caractéristiques du produit transporté, la valeur finale du risque a été calculée à l'aide de l'équation (1). Les résultats quantitatifs finaux sont présentés dans la figure IV.10.

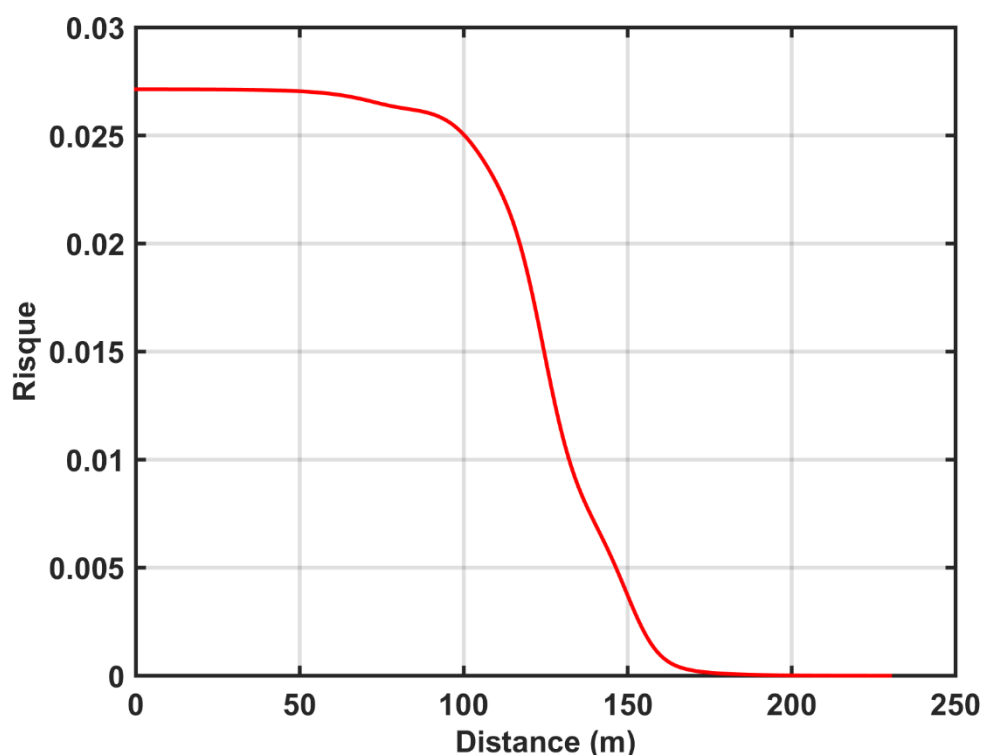


Figure IV.10 Valeur du risque de dissémination chimique.

La figure IV.10 illustre l'évolution du risque en fonction de la distance par rapport au point de fuite. Comme le montre cette figure, le niveau de risque est significativement élevé jusqu'à environ 100 mètres, reflétant une forte exposition dans la zone immédiate de l'incident. Ensuite, le risque diminue progressivement pour devenir quasiment nul à partir de 175 mètres, ce qui traduit une atténuation sensible de l'impact au-delà de cette zone critique.

#### IV.4. Conclusion

Ce travail de recherche propose une approche intégrée combinant l'Analyse de l'Arbre de Défaillance Floue, la méthode AHP Floue et FIS pour l'évaluation quantitative du risque dans le TRMD. L'analyse de l'arbre de défaillance a été utilisée pour identifier un ensemble

d'événements de base susceptibles de conduire à un événement indésirable majeur (TE). Les jugements d'experts, exprimés sous forme de nombres flous, ont permis d'évaluer la possibilité d'occurrence de chaque événement de base. Afin de réduire les biais cognitifs, quatre experts aux profils variés (en termes de poste, d'expérience, de niveau d'éducation et d'âge) ont été sollicités. La méthode AHP Floue a été appliquée pour déterminer les poids relatifs des experts selon ces critères. Les jugements ainsi pondérés ont ensuite été agrégés à l'aide de la méthode du Centre de Gravité (CoA). Les valeurs obtenues ont été converties en probabilités à l'aide de l'équation d'Onisawa. Enfin, l'algèbre booléenne a été employée pour estimer la probabilité globale de survenue du TE.

L'application du FIS a permis d'obtenir une mesure globale du risque, à travers le calcul du coefficient de correction CF pour l'itinéraire étudié. Ce calcul a intégré à la fois la nature du produit transporté (éthanol) et le type de danger potentiel associé. Les résultats ont permis d'identifier 11 événements intermédiaires et 27 événements de base, avec une probabilité de survenue de l'événement indésirable (TE) estimée à 0,054. L'étude a également montré que la distance de sécurité minimale pour limiter les effets de la dispersion d'éthanol en cas de fuite est d'environ 175 mètres. Ces résultats démontrent que les méthodes proposées (FFTA, AHP flou, FIS) peuvent être utilisées comme outils fiables et efficaces pour la quantification des risques dans le contexte complexe du TRMD.

## **CHAPITRE V**

### ***Système d'inférence neuro-flou adaptatif pour le TRMD***

## V.1. Introduction

L'acheminement de matières dangereuses constitue l'un des piliers de l'économie florissante. Avec l'expansion des villes et des sociétés industrielles, la demande en matières dangereuses ne cesse d'augmenter, entraînant une hausse du volume de transport ainsi qu'une complexification des caractéristiques de ces substances. Celles-ci peuvent être radioactives, explosives, inflammables ou toxiques. Selon leur nature, divers types d'accidents peuvent survenir, impliquant différentes combinaisons de scénarios. Les conséquences possibles incluent des explosions, des incendies, des fuites, ainsi que d'autres incidents. Ces accidents peuvent représenter une menace sérieuse pour l'être humain, l'environnement et l'économie. Par conséquent, les risques associés à la circulation des produits dangereux ont considérablement augmenté ces dernières années. Selon les statistiques, environ 72 incidents impliquant des matières dangereuses ont été signalés chaque année entre 2013 et 2017 [138–142].

Afin de garantir la sécurité et la fiabilité du TRMD, l'évaluation des risques doit faire l'objet d'un examen approfondi et approprié. Deux aspects fondamentaux doivent être définis dans les processus de gestion des risques : l'analyse des risques et l'évaluation des risques. L'analyse des risques a pour objectif d'identifier les dangers potentiels susceptibles de représenter une menace sérieuse, en s'appuyant sur des informations systématiquement disponibles. En revanche, l'évaluation des risques consiste à mesurer et à classer le niveau de risque en fonction de certains attributs [143]. Plusieurs études ont eu recours à des méthodes d'évaluation des risques pour analyser ceux liés au TRMD [144–149]. Les auteurs de [150] ont proposé un réseau bayésien afin de calculer la probabilité de survenue d'un risque dans le cadre du transport routier de matières dangereuses. Ceux de [151] ont présenté une analyse des risques professionnels combinée à la méthode FAHP pour identifier les facteurs de risque et d'insécurité influençant la sécurité des camions pétroliers. Dans [152], pour évaluer le risque associé au transport routier, les auteurs ont proposé une analyse d'enveloppement des données (DEA) afin de classer les niveaux de risque. Ils ont également introduit un modèle d'équations structurelles pour étudier la relation entre les variables latentes et le niveau de risque en matière de sécurité routière. Néanmoins, des défis subsistent, notamment en ce qui concerne la transformation des dangers en accidents, la baisse de performance des modèles prédictifs, ainsi que le traitement des données dans les approches fondées sur l'estimation des risques.

Dans le cadre de l'utilisation de techniques basées sur l'apprentissage automatique, ou Machine Learning (ML), l'analyse des risques liés au transport routier de matières dangereuses (TRMD) constitue un domaine privilégié pour la prévision et l'évaluation des accidents. Les approches ML se divisent en deux grandes catégories : les modèles paramétriques (régression logistique, régression de Poisson, etc.) et les modèles non paramétriques (machines à vecteurs de support – SVM, arbres de décision, réseaux de neurones artificiels, etc.). Les modèles paramétriques supposent une distribution de probabilité afin de capturer la relation entre les différents facteurs, tandis que les modèles non paramétriques apprennent directement à partir des données et peuvent gérer les relations non linéaires entre les attributs [153]. Plusieurs travaux notables se sont concentrés sur l'utilisation du Machine Learning pour prédire les risques associés au TRMD [154–157].

En effet, pour surmonter les défis évoqués précédemment, le modèle ANFIS et ses implémentations peuvent être introduits. Cette approche hybride, combinant un réseau neuronal

artificiel et un système flou, constitue une technique puissante, capable de mieux prendre en compte la non-linéarité et les incertitudes inhérentes aux données, tout en capturant efficacement les relations entre les facteurs contributifs [158]. Grâce à sa structure, l'ANFIS est un modèle performant pour l'estimation du risque, et a été appliqué avec succès dans divers domaines, tels que les prévisions météorologiques [159], la thermochimie [160], l'évaluation spatiale du risque de glissements de terrain [161], ou encore l'industrie de l'énergie électrique [162]. Par ailleurs, plusieurs études ont démontré que l'ANFIS surpassait les réseaux neuronaux artificiels traditionnels en termes de performance prédictive [163–164].

Cependant, pour garantir des performances optimales, une sélection rigoureuse des paramètres du modèle est indispensable. Ces dernières années, l'application d'algorithmes d'optimisation méta-heuristiques a suscité un intérêt croissant. L'objectif principal de ces algorithmes est d'atteindre une solution quasi-optimale en fonction d'un objectif défini ou d'une fonction d'évaluation. De nombreuses études ont exploité ces algorithmes dans le contexte du TRMD. Par exemple, Huang et al. [165] ont utilisé les méthodes PSO, GS et GA pour ajuster les paramètres de la fonction de base radiale (RBF) d'un modèle SVM, afin d'estimer le risque dans le transport ferroviaire de matières dangereuses. Mourad et al. [166] ont appliqué un modèle ANFIS optimisé à l'aide de plusieurs algorithmes méta-heuristiques notamment PSO, FA, ICA et HBBO pour prédire le risque de coût lié au transport routier de substances dangereuses. Zhang et al. [167] ont proposé l'utilisation de l'algorithme génétique (GA) pour sélectionner les itinéraires les plus sûrs. Enfin, Wang et al. [168] ont développé un algorithme heuristique de réglage bidirectionnel ainsi qu'un algorithme OSP (Optimal Selection Process) pour résoudre le problème d'acheminement de véhicules hétérogènes à partir de dépôts multiples.

Afin de relever les défis identifiés et de combler les lacunes existantes dans la littérature, la présente étude propose les contributions suivantes :

- L'application du modèle ANFIS pour prédire à la fois la concentration des matières dangereuses libérées et le coût du risque associé au TRMD.
- L'optimisation des paramètres du modèle ANFIS à l'aide de plusieurs algorithmes d'optimisation méta-heuristiques.
- L'estimation de la gravité des rejets de dioxyde de soufre sur la santé humaine.

Motivée par la discussion précédente, la présente étude vise à introduire un cadre intégrant un système ANFIS pour prédire à la fois la concentration de matières dangereuses dans l'atmosphère sur la base des modèles SPM et gaussien ainsi que la valeur du coût du risque associé. Le modèle ANFIS a été optimisé à l'aide de quatre algorithmes méta-heuristiques : PSO, FA, ICA et HBBO. Le cadre proposé a été validé à partir des données issues de l'expérience *Prairie Grass* ainsi que par une étude de cas portant sur la distribution de pétrole et de ses dérivés dans la ville de Belgrade, en Serbie. Afin d'évaluer les performances du modèle prédictif, plusieurs métriques couramment utilisées ont été prises en compte : l'erreur quadratique moyenne (MSE), la racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE), l'erreur absolue moyenne (MAE) et le coefficient de détermination ( $R^2$ ).

## V.2. Model de dispersion de matière dangereuse

### V.2.1. Modèle SPM

SPM est un modèle bien connu, qui traite de manière significative la libération du matériau à proximité du sol et étudie en profondeur la relation entre la diffusion verticale et le cisaillement du vent, notamment lorsque l'asymétrie est transformée en variance diffusive le long de la direction du vent au moyen de l'approximation donnée par Van Ulden. La concentration du matériau  $\chi$  est la somme des bouffées, exprimée par [169] :

$$\chi(\xi, y, z) = \frac{AQ}{2\pi\Sigma_d\Sigma_n\langle z \rangle} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left( \frac{\xi - \xi_s}{\Sigma_d} \right)^2 - \frac{1}{2} \left( \frac{y}{\Sigma_n} \right)^2 - \left( \frac{Bz}{\langle z \rangle} \right)^s \right\} \quad (V.1)$$

Où  $y, z, Q$  représentent respectivement les coordonnées du vent latéral, du flux vertical et du flux d'émission,  $\Sigma_n, \Sigma_d$  et  $\Sigma_s$  indiquent l'écart type latéral, l'écart-type de la répartition de concentration autour du centroïde du nuage et la coordonnée du centroïde du nuage,  $\eta$  représente le nuage suivant la direction  $y$  et  $\langle z \rangle$  décrit dans l'équation (V.2) représente la profondeur moyenne du nuage.

$$\langle z \rangle = \frac{1}{Q} \int z \cdot \chi \cdot d\xi \cdot dy \cdot dz \quad (V.2)$$

Avec  $\xi$  dénote le nuage le long de la coordonnée qui est représentée par :

$$\xi = x - X(t) \quad (V.3)$$

$X(t)$  est défini par l'équation 4 et  $x$  représente la coordonnée longitudinale du vent moyen.

$$X(t) = \int x \cdot C \cdot dx \cdot dy \cdot dz \quad (V.4)$$

Où  $\xi$  et  $C(x; y; z)$  indiquent respectivement la coordonnée de la bouffée centroïde et la concentration dans les coordonnées fixes,  $B$  et  $A$  sont données par :

$$A(s) = s\Gamma(2/s) / \{\Gamma(1/s)\}^2 \quad (V.5)$$

$$B(s) = s\Gamma(2/s) / \Gamma(1/s) \quad (V.6)$$

Où  $\Gamma$  et  $s$ , désignent respectivement le paramètre et la fonction Gamma, qui définissent les profils de concentration, la profondeur moyenne des nuages et la longueur de Monin-Obukhov.

### V.2.2. Modèle gaussien

Le modèle de bouffée gaussien est une méthode complète qui permet de représenter la libération instantanée de polluants dans le champ de dispersion atmosphérique. Il peut être formulé comme suit :

$$C(x, y, z) = \frac{m}{(2\pi)^{3/2} \sigma_v \sigma_h} e^{-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma_h^2}} \left[ e^{-\frac{(z-h)^2}{2\sigma_v^2}} + e^{-\frac{(z+h)^2}{2\sigma_v^2}} \right] \quad (V.7)$$

Où  $C(x, y, z)$  désigne la concentration dans l'air à l'emplacement  $x, y$  et  $z$ ,  $m$  représente la masse de matière,  $\sigma_v$  et  $\sigma_h$  indiquent les paramètres de dispersion verticale et horizontale, et  $h$  est la hauteur d'émission [170-173].

### V.3. Résultats et discussion

#### V.3.1. Estimation de la concentration et gravité de la matière dangereuse avec ANFIS-PSO et FL

La libération de matières dangereuses constitue un problème complexe, nécessitant souvent une prévision précise de la dispersion des matières, essentielle pour la planification des évacuations et la mise à l'abri des populations. En général, le manque de données fiables et précises accentue cette complexité, notamment en raison des incertitudes liées aux modèles de dispersion atmosphérique, aux processus de mesure, ainsi qu'aux données météorologiques.

Pour dépasser ces limitations, la présente étude propose une méthode structurée en trois phases : l'utilisation de ANFIS pour prédire le niveau de concentration de la matière rejetée, l'optimisation des paramètres de l'ANFIS à l'aide de l'algorithme PSO et l'intégration d'un système d'inférence flou pour évaluer la gravité de la matière libérée (voir Figure V.1).

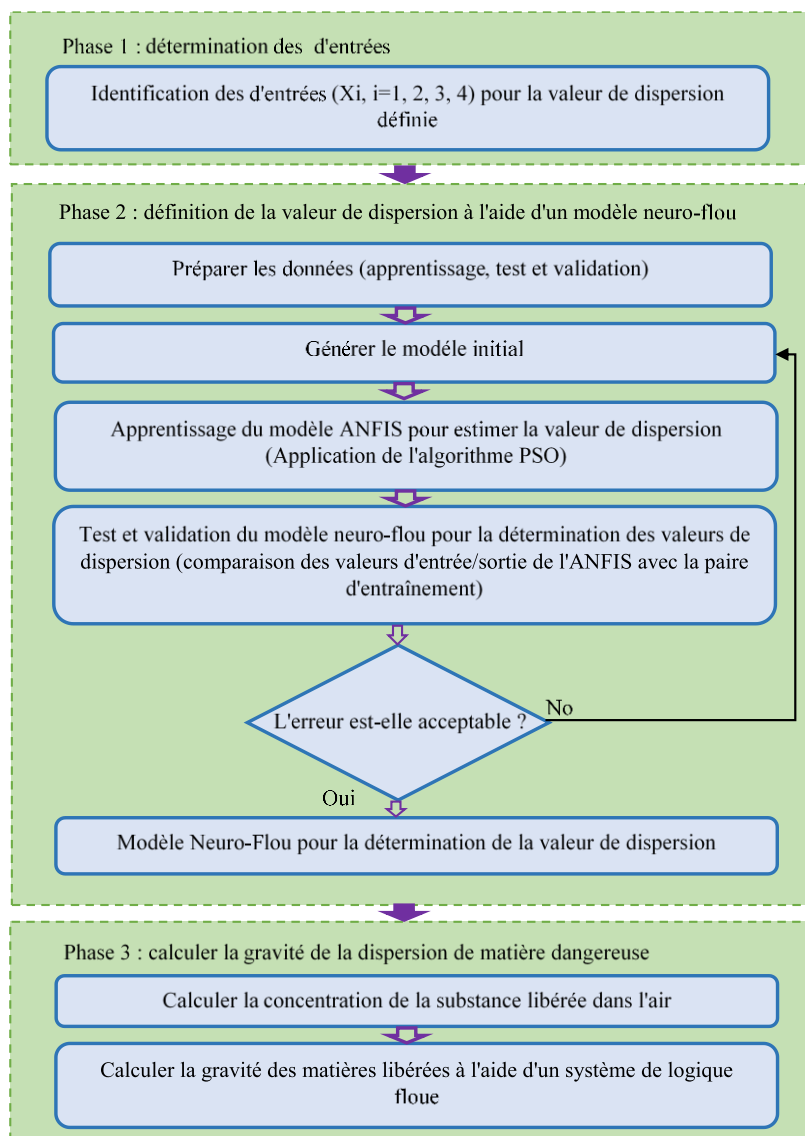


Figure V.1 Organigramme de la méthodologie

- Dans la première étape du modèle ANFIS, les paramètres d'entrée (facteurs) sont sélectionnés en fonction des modèles atmosphériques utilisés. Un réseau neuro-flou adaptatif est alors structuré afin de prédire le niveau de dispersion dans l'air. Les facteurs d'entrée de ce réseau correspondent à plusieurs variables prédictives qui caractérisent la dispersion atmosphérique, telles qu'elles sont définies à la fois par le modèle de bouffée gaussienne et par le modèle SPM.

- Dans la deuxième étape de la méthode proposée, un système d'inférence flou initial est généré, puis développé/amélioré à l'aide de l'algorithme de PSO. La sortie (valeur prédite) est le niveau de concentration de la matière libérée. Le modèle ANFIS calcule cette dernière à partir des prédicteurs par le biais de 5 phases distinctes comme indiqué dans la section 3. Dans la première étape, les entrées et les fonctions d'appartenance sont sélectionnées afin de générer le premier système. dans la deuxième étape, les sorties de la première couche sont multipliées pour calculer la force des règles floues de type "si-alors". Dans la troisième étape, tous les signaux de la troisième couche sont normalisés, ensuite dans la quatrième couche, la déffuzzification est obtenue grâce à l'équation 14 et enfin, la sortie (concentration de la matière libérée) est obtenue en additionnant tous les signaux.
- Après avoir estimé la concentration des matières libérées, la troisième phase consiste à évaluer la gravité de la contamination à l'aide de la logique floue.

Tous les aspects et résultats obtenus par la méthodologie proposée sont examinés et discutés dans les sous-sections suivantes.

### V.3.1.1. ANFIS-PSO basé sur le modèle SPM

L'objectif principal de ce travail est de démontrer la capacité prédictive de la méthode ANFIS-PSO, en s'appuyant sur les données issues de l'expérience Prairie Grass.

L'expérience Prairie Grass a été menée à O'Neill, dans l'État du Nebraska (États-Unis). Lors de cette expérience, des traceurs de dioxyde de soufre ont été libérés à une hauteur de 1,5 m à partir d'une source continue, afin de mesurer la concentration du matériau au niveau du sol. Les mesures ont été effectuées par des dispositifs d'échantillonnage positionnés en arcs perpendiculaires au vent, à des distances de 50, 200 et 800 mètres du point de libération. Le tableau V.1 présente les valeurs mesurées de la vitesse de frottement, de la longueur de Monin-Obukhov, des distances ainsi que des niveaux de concentration [174].

Tableau V.1 Données dérivées de l'expérience Prairie Grass [175].

Run	L	U	C			Run	L	U	C		
			50	200	800				50	200	800
1	-8,6	0,19	86	7		31	-51	0,5	33	9	13
2	-14	0,13		9		32	-76	0,6	30	9	1,3
3	-28	0,39	44	11		33	53	0,24	88	32	10
4	-84	0,44	44	12	1,9	34	6,8	0,11	170	141	27
5	-9,8	0,31	52	7		35	7,8	0,1	193	100	41
6	-18	0,31	56	12	1,6	36	95	0,29	61	21	7
7	-31	0,46	40	11	1,5	37	99	0,28	78	26	8
8	-11	0,32	49	8		38	9,8	0,14	112	39	
9	-66	0,5	37	12	1,9	39	8	0,11	115	43	17
10	-47	0,52	34	11	2,1	40	35	0,23	79	32	12
11	3,4	0,09	38	223	133	41	120	0,37	52	17	5
12	1,6	0,05	153	153	31	42	-16	0,35	51	11	1,2
13	-7,6	0,23	74	15	1,2	43	-25	0,4	45	11	1,2
14	-5,2	0,24	54	5		44	-87	0,39	52	17	3,5
15	48	0,21	105	34	11	45	114	0,34	63	23	7

16	25	0,2	108	46	20	46	-7,8	0,21	48	6	
17	-28	0,39	45	8		47	-63	0,51	30	9	1,5
18	-62	0,6	34	9	1,6	48	-28	0,45	43	12	1,6
19	172	0,38	58	18	16	49	-26	0,44	41	9	1,2
20	204	0,46	47	14	4	50	-40	0,45		11	
21	193	0,39	47	17	4	51	10	0,17	154	83	32
22	248	0,38	47	17	4	52	40	0,24	81	38	11
23	-6,2	0,2	78	8		53	124	0,37	53	18	5
24	-32	0,43	40	16	1,3	54	76	0,29	71	24	7
25	-30	0,42	43	13	1,9	55	-194	0,46	42	13	2,7
26	24	0,16	136	51	15	56	6,4	0,11	161	105	51
27	36	0,23	99	38	12	57	11	0,14	140	81	31
28	-39	0,46	42	12	1,2	58	58	0,28	62	23	8
29	-67	0,21	37	13	4	59	-38	0,51	35	11	2,6
30	8,3	0,13	159	115	56	60	-30	0,34	50	13	2,3

Afin d'évaluer la robustesse de l'approche proposée, quatre indices statistiques ont été utilisés dans cette étude, à savoir : 'l'erreur quadratique moyenne normalisée (NMSE), le coefficient de corrélation (R), le facteur deux de prédiction (FAC2) et la fraction de biais (FB)'. Ces indices sont définis par les formules suivantes :

$$NMSE = \frac{\overline{(c_0 - c_p)^2}}{\overline{c_0} * \overline{c_p}} \quad (V.8)$$

$$R = \frac{\overline{(c_0 - \overline{c_0})(c_p - \overline{c_p})}}{\sigma_0 \sigma_p} \quad (V.9)$$

$$FAC2 = -0.5 \leq \frac{c_p}{c_0} \leq 2 \quad (V.10)$$

$$FB = 2 \frac{\overline{c_0} - \overline{c_p}}{\overline{c_0} + \overline{c_p}} \quad (V.11)$$

$$FD = 2 \frac{\overline{\sigma_0} - \overline{\sigma_p}}{\overline{\sigma_0} + \overline{\sigma_p}} \quad (V.12)$$

Où  $c_p$  et  $c_0$  indiquent la concentration prédite et la concentration observée,  $\sigma$  représente l'écart-type. Plusieurs études notables menées à travers diverses expériences et applications dans le domaine de la dispersion atmosphérique ont permis de constater que les meilleurs indices statistiques de chaque technique proposée doivent respecter les attributs suivants : (1) le biais moyen doit varier entre -0,3 et 0,3 ; (2) le facteur deux doit être supérieur à 50 % ( $FAC2 \geq 0,5$ ) ; (3) l'erreur quadratique moyenne normalisée doit être inférieure à 4 [176].

Dans cette étude, un système Takagi-Sugeno associé à l'algorithme de regroupement flou c-means a été choisi. Les résultats ont été obtenus à l'aide du logiciel Matlab. Quatre facteurs contributifs ont été sélectionnés pour le modèle SPM, dont trois en tant qu'entrées et un en tant que sortie :

- Entrées : la longueur de Monin-Obukhov (L), la vitesse de frottement (U) et la distance au point de libération.
- Sortie : le niveau de concentration du matériau libéré.

La figure V.2 présente le schéma de principe utilisé pour résoudre les problèmes liés au transport de matières dangereuses sur la base du modèle SPM.

70 % des données ont été utilisées au hasard dans les phases de formation, tandis que 30 % des données restantes ont été sélectionnées pour l'étape de test.

Dans cette étude, l'approche PSO a été adoptée pour ajuster à la fois les paramètres linéaires ( $p_i$ ,  $q_i$  et  $r_i$ ) et les paramètres non linéaires (la moyenne et la variance des fonctions d'appartenance gaussiennes) du modèle ANFIS. L'objectif est d'optimiser les performances prédictives du modèle, en particulier pour la concentration en hauteur des substances libérées. Le tableau V.2 présente les paramètres utilisés pour l'implémentation de l'approche ANFIS-PSO dans ce travail.

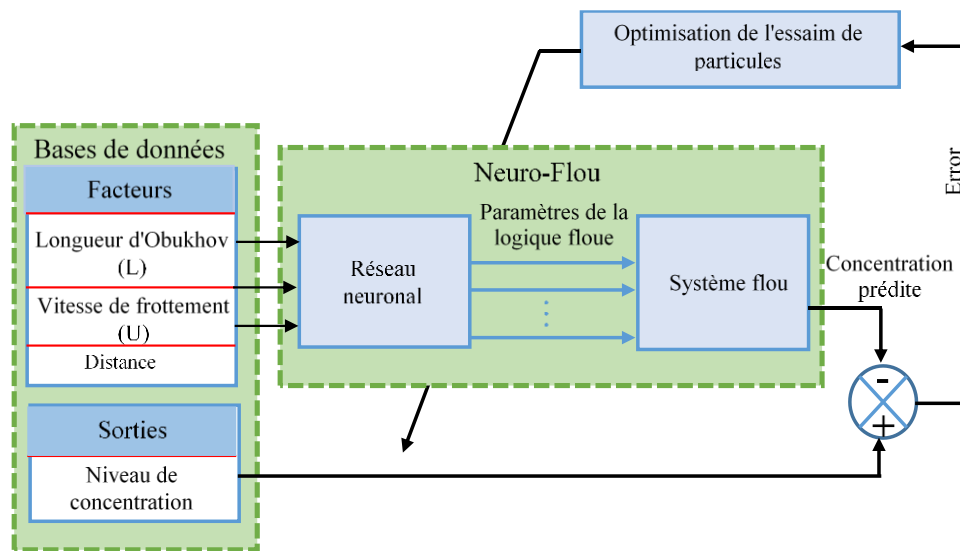


Figure V.2 Schéma de principe pour la résolution des problèmes liés aux matières dangereuses sur la base du modèle SPM

Tableau V.2 Paramètres d'ANFIS-PSO pour le modèle SPM.

Paramètres	ANFIS-PSO
Type du system	Takagi-Sugeno
Fonctions d'appartenance	Gaussian
Nombre d'itérations	1000
Nombre de particules	200
w	0.7
$c_1$	1
$c_2$	2
Critères d'arrêt	Nombre d'itérations

Pour optimiser/régler le modèle ANFIS avec PSO, la fonction de coût suivante a été prise en compte :

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\text{réel}(t) - \text{estimé}(t))^2}{n}} \quad (V.13)$$

Où  $\text{estimé}(t)$  et  $\text{réel}(t)$  représentent les valeurs estimées et les valeurs réelles et  $n$  représente le nombre d'ensembles de données.

Les résultats obtenus par ANFIS-PSO basé sur le modèle SPM sont présentés dans Figures V.3 et V.4 pour les phases d'entraînement et de test.

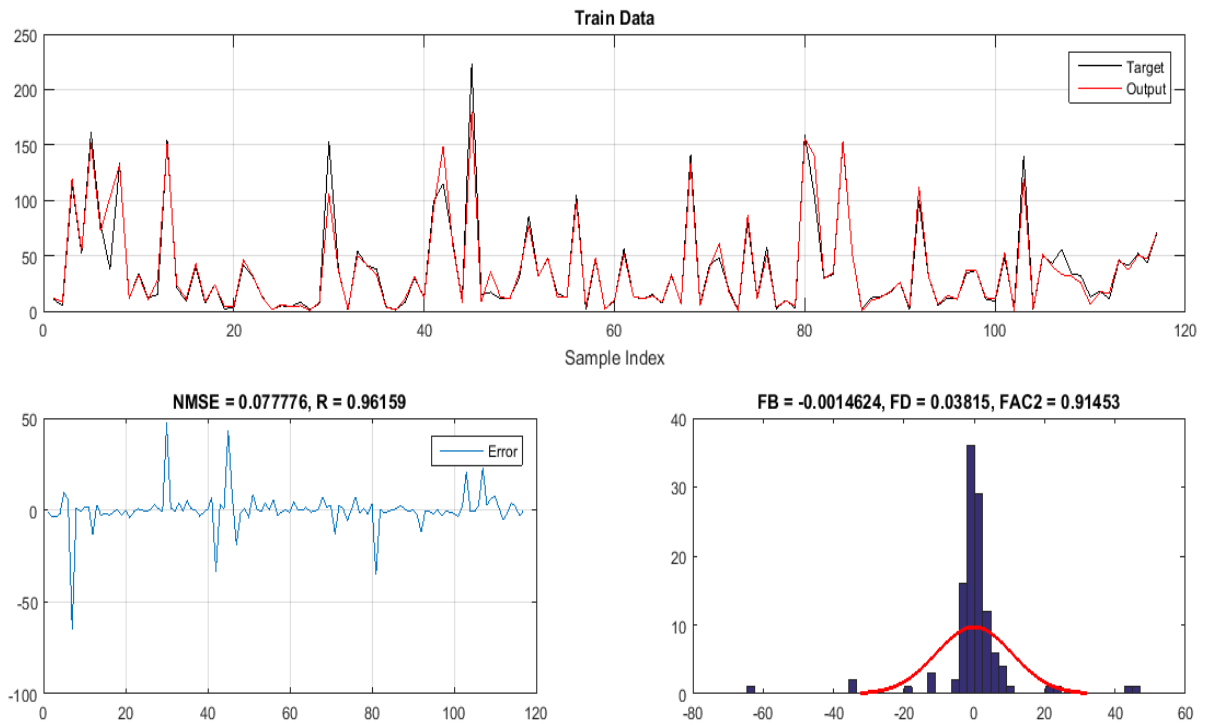


Figure V.3 La réponse d'ANFIS-PSO basée sur le modèle SPM dans la phase de formation

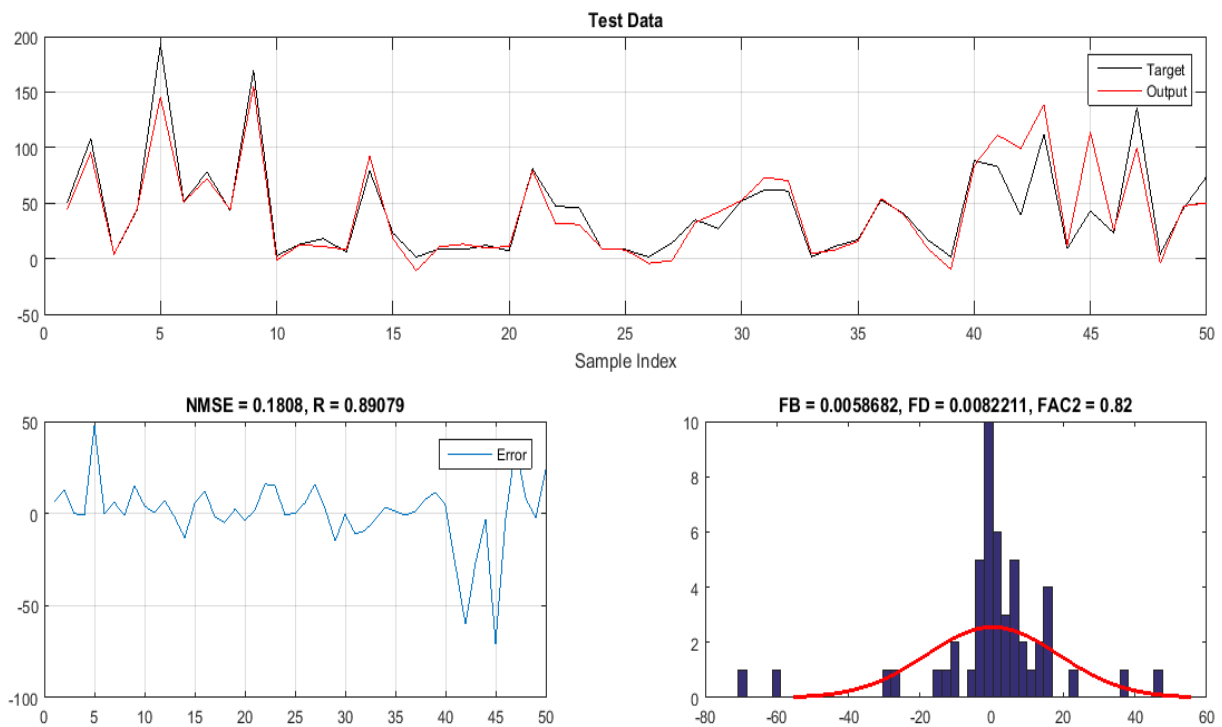


Figure V.4 La réponse d'ANFIS-PSO basée sur le modèle SPM des données d'essai

Les figures V.3 et V.4 illustrent les données observées issues de l'expérience Prairie Grass (en noir), ainsi que les sorties prédites par le modèle ANFIS-PSO (en rouge), accompagnées des courbes d'erreur et des histogrammes des erreurs pour les ensembles de

données d'entraînement et de test. Ces figures montrent une bonne concordance entre les valeurs prédites et les observations expérimentales.

L'analyse de la distribution des erreurs, présentée dans les histogrammes, suggère que les écarts suivent globalement une loi normale. Le tableau V.3 confirme cette tendance en indiquant que les valeurs des quatre indices statistiques utilisés (NMSE, R, FAC2, FB) satisfont de manière remarquable aux critères d'évaluation habituellement retenus pour les modèles de dispersion atmosphérique. Par conséquent, il est possible de conclure que la méthode proposée répond efficacement aux exigences du domaine.

Tableau V.3 Les indices statistiques obtenus par l'approche proposée.

Métriques obtenues	phase de formation	phase de test
NMSE	0.0778	0.18
R	0.961	0.891
FB	-0.0014	0.00586
FD	0.0381	0.0082
FAC2	0.915	0.82

### V.3.1.2. ANFIS-PSO basé sur le modèle Gauss Puff

Afin d'évaluer plus précisément les performances de la technique proposée, celle-ci a été appliquée à la prédiction de la concentration maximale de la matière dangereuse en utilisant le modèle complet de la bouffée gaussienne. Un ensemble de 201 données a été généré à l'aide du logiciel ALOHA, sur la base des conditions météorologiques issues de l'expérience Prairie Grass. La concentration de dioxyde de soufre libéré a été estimée à une hauteur de 1,5 mètre, aux distances de 50, 200 et 800 mètres par rapport au point de libération. Le tableau V.4 présente les données obtenues par le logiciel ALOHA à partir des paramètres expérimentaux de Prairie Grass.

Tableau V.4 Données obtenues par le logiciel ALOHA sur la base des données météorologiques de l'expérience " Prairie Grass ".

Q	U	W	50	Cmax			U	Q	WD	50	Cmax		
				200	800						200	800	
81,5	2,62	161	657	43,1	3	38,8	1,86	132	570	59,2	4,71		
83,9	2,01	207	622	39,2	2,68	40	1,86	160	583	61,8	4,96		
56,3	3,01	152	682	58,2	4,36	40,3	4,64	187	271	18,3	1,3		
50,5	1,4	216	1820	150	15,4	45,4	4,14	170	338	23	1,63		
77,8	6,47	178	410	27,2	1,93	40,7	3,12	140	393	27,4	1,95		
89,9	4,19	188	695	48,4	3,44	40,5	3,08	180	409	27,8	1,97		
91,1	4,85	184	616	42,4	3,01	39,9	4,04	198	309	20,8	1,47		
92	6,88	204	446	30,2	2,14	56,4	5,81	212	308	20,5	1,45		
92,1	4,6	225	667	45,4	3,21	98,9	4,95	170	614	42	2,98		
95,9	7,03	184	456	30,8	2,18	100,7	5,71	158	553	37,1	2,63		
99,1	8,35	184	396	26,8	1,9	100,8	6,12	163	521	34,7	2,46		
61,1	1,25	190	796	52	3,41	99,7	5,15	134	585	40,5	2,89		
49,1	1,91	170	575	38,3	2,65	103,1	3,58	243	584	39,3	2,76		
95,5	3,43	209	597	40,4	2,84	104	3,38	163	628	42,1	2,95		
93	3,23	192	634	43	3,02	104,1	8,04	214	404	27,2	1,93		
56,5	3,33	184	369	24,6	1,73	102	6,27	199	506	34,2	2,43		

57,6	3,53	187	496	34,3	2,44	102,8	6,57	215	496	33	2,34
101,8	5,81	166	553	36,9	2,62	102,4	6,12	245	528	35,3	2,5
101,2	8,6	178	374	24,8	1,76	104	4,29	132	740	51	3,62
50,9	6,12	181	264	17,5	1,24	45,2	2,51	132	838	57,2	3,99
48,4	6,42	176	237	15,9	1,12	43,4	4,04	140	330	22,6	1,6
40,9	5,91	128	222	14,6	1,03	45,3	5,41	156	266	17,7	1,25
41,2	6,22	141	208	13,9	0,981	45,9	4,34	153	328	22,2	1,58
101,4	2,77	177	306	20,2	1,42	101,5	6,67	200	474	32	2,27
97,6	6,77	190	453	30,4	2,15	40,5	1,91	178	442	29,5	2,05
98,8	6,57	184	467	31,6	2,24	40,2	2,62	174	546	47,7	3,53
41,7	2,62	174	477	33,4	2,38	38,5	4,9	198	246	16,5	1,17
41,5	3,48	220	363	25	1,78	102,1	7,99	203	399	26,9	1,91
98,4	6,82	196	454	30,4	2,15	102,1	5,15	212	624	41,8	2,96
96	7,33	225	413	27,6	1,95	44,1	4,44	178	314	21	1,48
41,4	2,21	171	574	57,1	4,35	43,1	3,08	166	424	29,4	2,09
94,7	8,5	181	355	23,5	1,66	45	4,34	185	323	21,8	1,54
97,4	9	146	339	22,8	1,61	42,8	2,82	174	454	31,8	2,27
41,8	4,04	135	320	21,8	1,54						

Les données d'entrée et de sortie utilisées dans le modèle ANFIS-PSO sont les suivantes : la vitesse du vent (U), la direction du vent (WD), le taux de libération (Q) et la distance selon l'axe transversal au vent, en tant que variables d'entrée ; et la concentration maximale (Cmax) de la matière libérée, en tant que variable de sortie. La figure V.5 illustre le schéma de principe adopté pour résoudre les problématiques liées au transport de matières dangereuses, sur la base du modèle Gaussian Puff.

Un système Takagi-Sugeno, associé à un algorithme de clustering flou de type c-means, a été adopté dans cette étude. Les simulations et les calculs ont été réalisés à l'aide du logiciel Matlab. Pour l'entraînement du modèle, 70 % des données dérivées ont été sélectionnées de manière aléatoire, tandis que les 30 % restants ont été utilisés pour la phase de test. Le tableau V.5 présente les paramètres de la méthode appliquée.

Afin d'évaluer la pertinence de la technique proposée, la fonction de coût ainsi que les indicateurs statistiques présentés dans la section précédente sont également pris en compte dans cette partie de l'étude.

Les résultats de l'ANFIS-PSO basé sur le modèle de Gauss Puff sont présentés dans les Figures V.6 et V.7 pour les phases d'apprentissage et de test.

Tableau V.5 Paramètres d'ANFIS-PSO pour le modèle Gauss Puff.

Paramètres	ANFIS-PSO
Type du system	Takagi-Sugeno
Fonctions d'appartenance	Gaussian
Nombre d'itérations	1000
Nombre de particules	200
w	0.7
c <sub>1</sub>	1

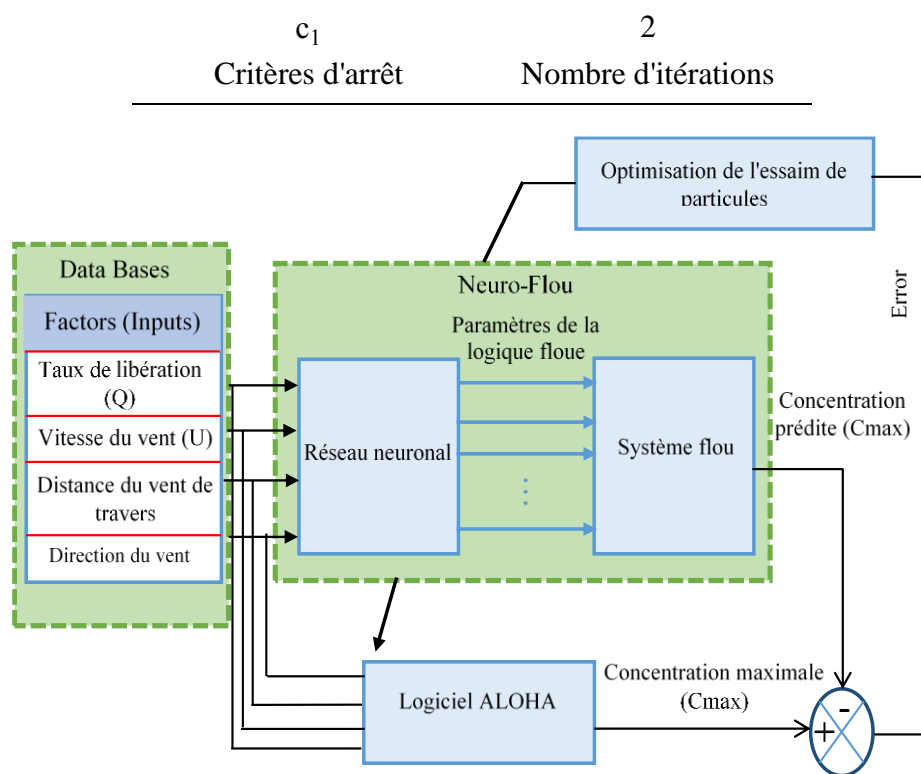


Figure V.5 Schéma de principe pour la résolution des problèmes liés aux matières dangereuses, basé sur le modèle de la bouffée de Gauss

Les figures V.6 et V.7 présentent les données dérivées du logiciel ALOHA (en noir) ainsi que les prédictions fournies par le modèle ANFIS-PSO (en rouge), accompagnées des courbes d'erreur et des histogrammes des erreurs pour les ensembles de données d'entraînement et de test. Aucune différence significative n'a été observée entre les résultats obtenus par ALOHA et ceux prédits par la méthode proposée, ce qui confirme la fiabilité et la précision du modèle ANFIS-PSO.

La distribution des erreurs, telle qu'observée dans les histogrammes, suit de manière remarquable une courbe normale. Les mêmes indices statistiques que précédemment 'l'erreur quadratique moyenne normalisée (NMSE), la fraction des prédictions dans un facteur deux des observations (FAC2), le coefficient de corrélation (R) et la fraction de biais (FB)' ont été utilisés pour évaluer la précision du modèle ANFIS-PSO. Les résultats confirment la performance élevée du modèle dans la reproduction des variables cibles, notamment la concentration maximale le long de l'arc de dispersion (voir tableau V.6).

Les discussions précédentes et les résultats obtenus confirment clairement que le système proposé maintient des performances élevées, même en cas de modification du modèle de dispersion atmosphérique. Cela témoigne de sa robustesse remarquable ainsi que de sa forte capacité d'apprentissage et de généralisation.

Tableau V.6 Les indices statistiques obtenus par l'approche proposée.

Métriques obtenues	phase de formation	phase de test
NMSE	0.04	0.046
R	0.984	0.968
FB	-0.0016	-0.029
FD	0.007	-0.029

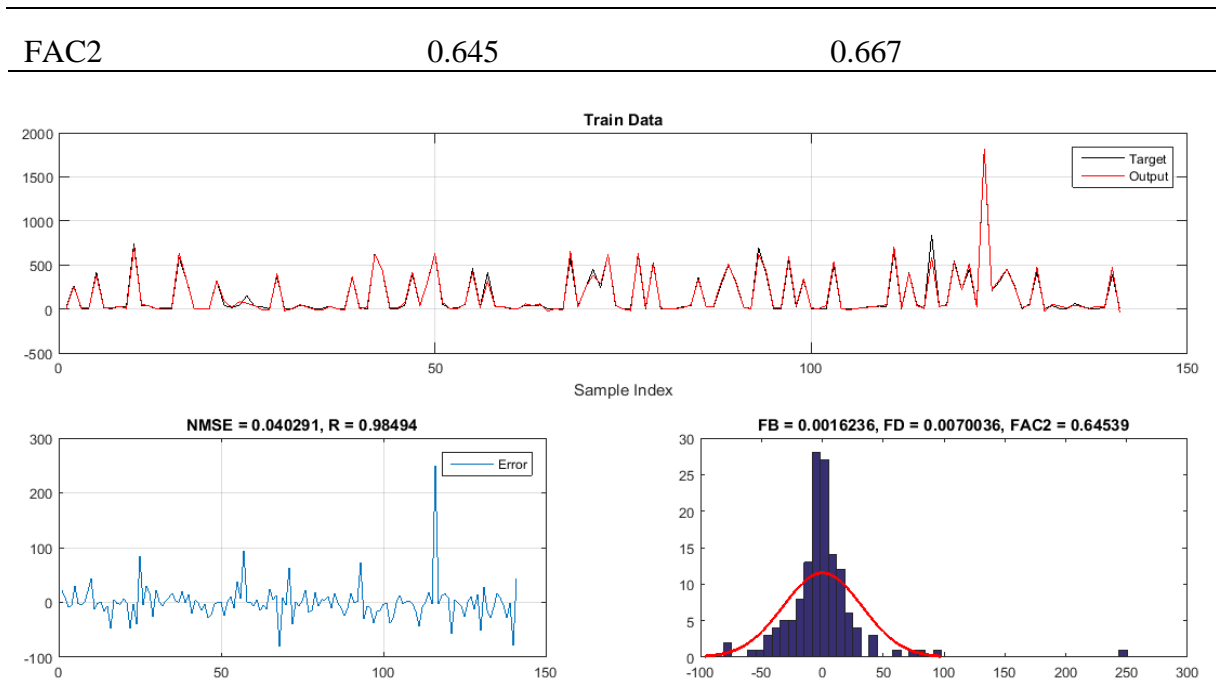


Figure V.6 Les performances d'ANFIS-PSO basées sur le modèle de bouffée de Gauss dans la phase d'apprentissage

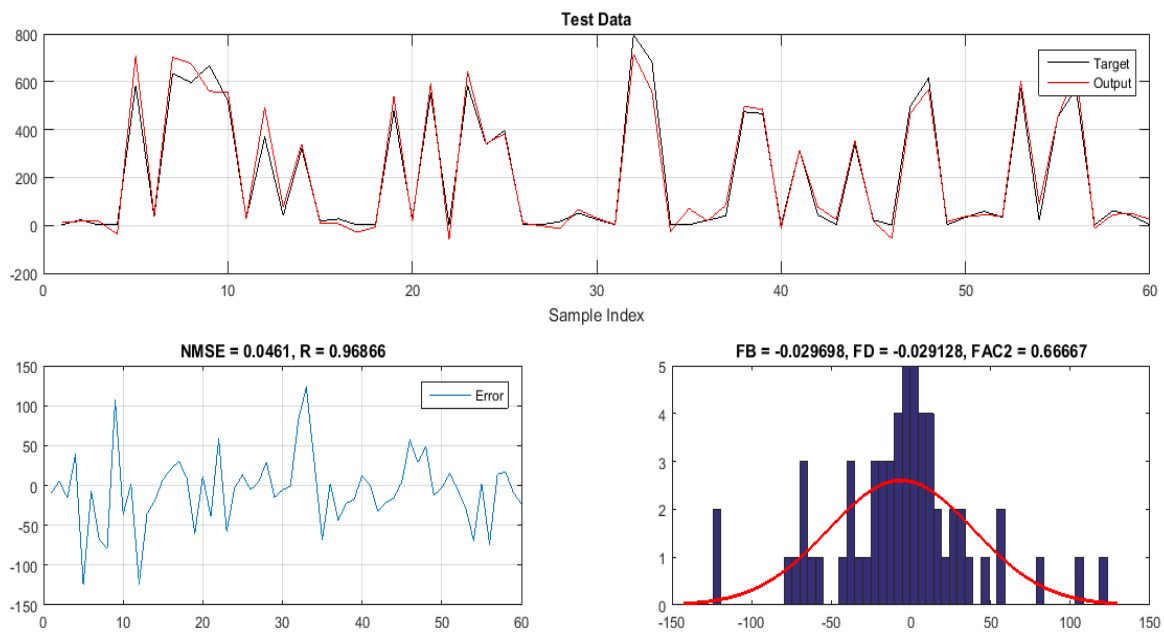


Figure V.7 Les performances d'ANFIS-PSO basées sur le modèle de bouffée de Gauss dans la phase d'essai

#### IV.3.1.3. Estimation de sévérité avec la logique floue

À la suite d'un rejet de matières dangereuses survenu lors des opérations de production ou de transport, les équipes de sécurité se trouvent souvent confrontées à des situations marquées par le stress, la peur et l'indécision, rendant la prise de décision particulièrement difficile. Identifier les ressources humaines et matérielles adéquates pour atténuer les effets de

l'incident, ainsi que déterminer le moment opportun pour intervenir, représente l'un de leurs principaux défis. Dans ce contexte, nous proposons une méthode d'estimation de la gravité des conséquences d'un rejet de dioxyde de soufre, fondée sur les principes de la logique floue.

Le système flou a été conçu afin d'évaluer le niveau de gravité lié au rejet de dioxyde de soufre. Pour élaborer ce système, trois variables d'entrée et une variable de sortie ont été prises en compte : le taux de rejet, la tranche d'âge de la personne exposée, les niveaux d'exposition aiguë (AEGL) et le niveau de gravité. Concernant les fonctions d'appartenance, une fonction gaussienne a été utilisée pour la première entrée (taux de rejet), une fonction trapézoïdale pour la deuxième entrée (tranche d'âge), ainsi qu'une fonction gaussienne pour la troisième entrée (niveaux AEGL) et pour la sortie (niveau de gravité).

Le modèle d'inférence floue développé dans cette étude est de type Mamdani. Pour l'opération de défuzzification, la méthode du « centre de gravité » a été choisie, cette technique étant l'une des plus couramment utilisées dans les domaines liés à l'évaluation des risques [177–179] et 20 règles d'inférences (voir le tableau V.7).

Les attributs d'entrée et de sortie, ainsi que leurs niveaux dans le modèle développé, sont présentés dans le tableau V.7. Les différentes fonctions d'appartenance, ainsi que les résultats relatifs à la sévérité pour différentes tranches d'âge, sont illustrés respectivement dans les figures V.8 et V.9.

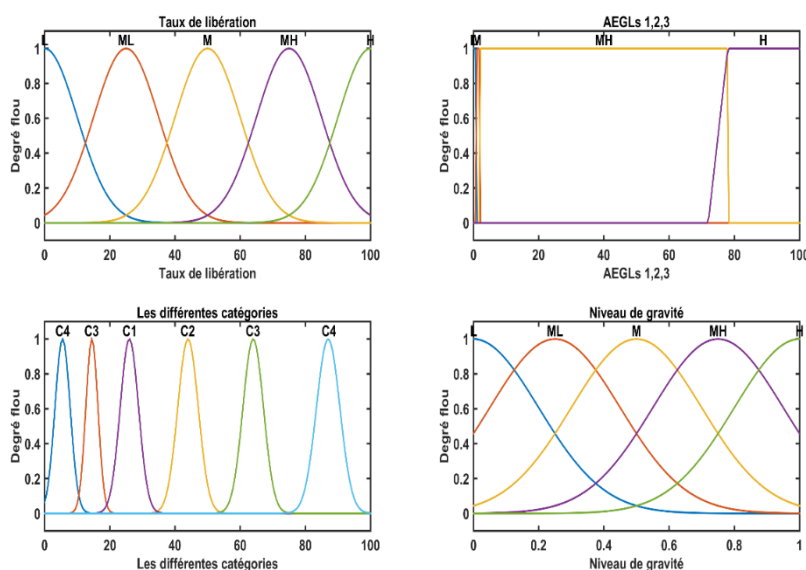


Figure V.8 Fonctions d'appartenance pour les entrées et les sorties du FL.

Tableau V.7 Les règles d'inférences floues.

Gravité sur	Catégorie 1 (C1)				Catégorie 2 (C2)				Catégorie 3 (C3)				Catégorie 4 (C4)			
	AEGL 1				AEGL 1				AEGL 1				AEGL 1			
Tau de libération	L	M	MH	H	L	M	MH	H	L	M	MH	H	L	M	MH	H

L	L	ML	M	MH	L	L	ML	M	L	L	L	ML	L	L	L	L
ML	M <sub>H</sub>	MH	MH	MH	MH	MH	M	M	M	MH	ML	M	ML	M	ML	ML
M	M <sub>H</sub>	MH	MH	MH	M	M	M	M	M	M	M	M	ML	ML	M	M
MH	M <sub>H</sub>	H	H	H	M	MH	MH	MH	M	M	M	MH	M	M	M	M
H	H	H	H	H	MH	MH	MH	H	MH	MH	MH	H	M	M	MH	H

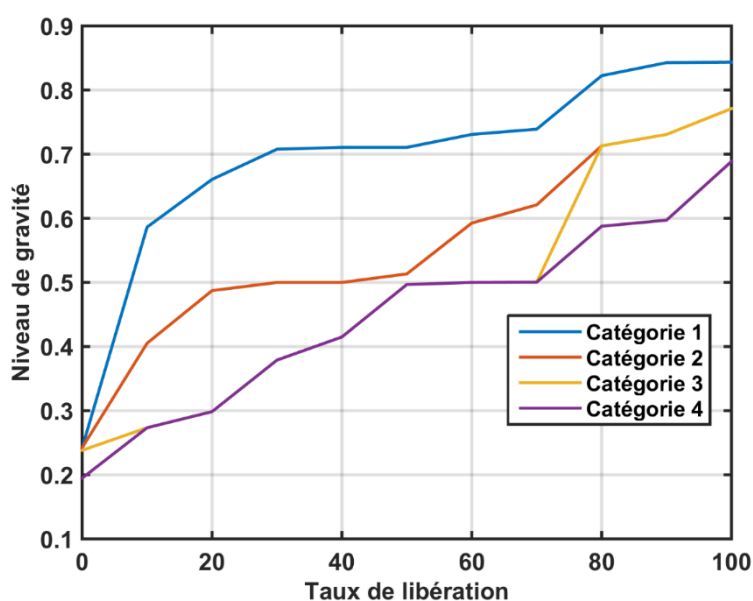


Figure V.9 Gravité pour différentes tranches d'âge

Tableau V.8 La classification des entrées et des sorties pour le matériel libéré.

Taux de libération	Tranche d'âge d'exposition	AEGL1,2,3	Niveau de gravité
Moins de 25 mg/m (L)	18-34 (C1)	Moins de AEGL1 (0.93) (L)	Faible (L)
Entre 50 et 75 (ML)	34-54 (C2)	Entre AEGL 1 et AEGL2 (0.93, 1.95) (M)	Modérément faible (ML)
Entre 50 et 75 (M)	11-18 et 54-74(C3)	Entre AEGL2 et AEGL3 (1.95,78) (MH)	Modéré (M)
Entre 75 et 100 (H)	Les personnes présentant des problèmes de santé complexes, les individus âgés de moins de 11 ans ou de plus de 74 ans,	Plus de AEGL 3 (H)	Modérément élevé (MH)

	ainsi que les femmes enceintes (C4)		
Plus 100 mg/m (L)			Elevé (H)

La figure V.9 illustre l'indice de gravité pour les quatre catégories de personnes, en fonction du taux de libération du matériau considéré. Comme le montre cette figure, les catégories 3 et 4 présentent un niveau de gravité nettement plus élevé, ce qui est cohérent, dans la mesure où ces groupes sont les plus vulnérables à tout type d'exposition aux rejets.

#### IV.3.2. Estimation du cout de risque d'un accident avec ANFIS base avec PSO, FA, ICA et HBBO

Le risque dans le TRMD peut résulter de divers mécanismes. Il dépend largement de facteurs humains, des conditions environnementales, de la qualité de la gestion, ainsi que de la défaillance des équipements. Selon le type de matière transportée, différents scénarios d'accident peuvent survenir, tels qu'une explosion, un incendie ou un rejet de matières toxiques, chacun étant la conséquence d'une combinaison d'événements associés à un accident de la route. Les dommages qui en résultent peuvent engendrer des conséquences significatives, classées en trois grandes catégories : environnementales, sociales et économiques (voir figure V.10).

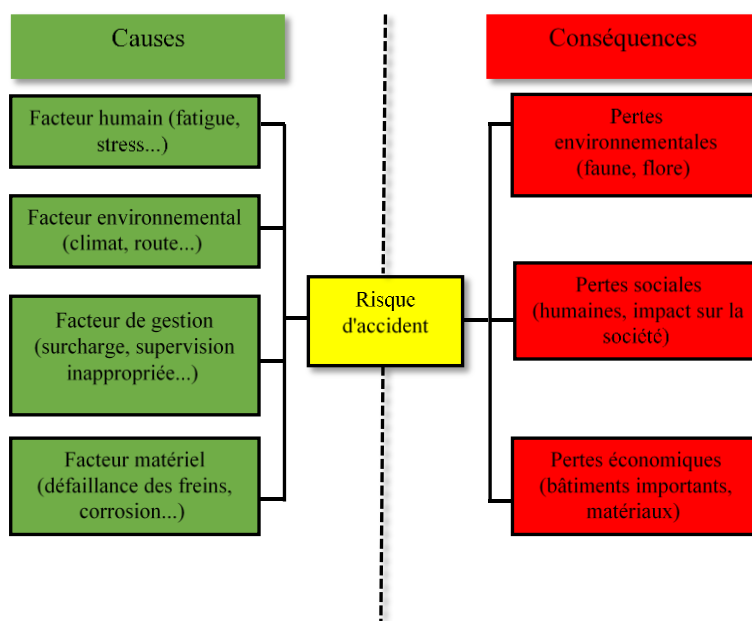


Figure V.10 Cadre hiérarchique des causes et conséquences des accidents de la route

Afin d'estimer le coût du risque (CR) associé à un accident impliquant le transport de matières dangereuses, cette étude propose une méthode fondée sur le modèle ANFIS. Cette méthode s'articule autour de trois étapes principales, illustrées à la figure V.11.

- Dans la première phase, les critères (ou variables d'entrée) influençant la valeur de CR sont identifiés. Ces entrées, ainsi que leurs descriptions, sont présentées dans le tableau V.8. Ensuite, le réseau routier concerné est sélectionné. Pour chaque tronçon reliant

deux nœuds (clients, stations de dépôt, etc.), les valeurs des paramètres d'entrée ainsi que la sortie correspondante (CR) doivent être renseignées.

- Dans la deuxième étape, le type de modèle ANFIS ainsi que les fonctions d'appartenance associées à chaque variable d'entrée et de sortie sont sélectionnés. Le premier modèle est ensuite généré afin d'établir une correspondance entre les entrées et la sortie (CR), en s'appuyant sur les différentes couches du système : fuzzification, produit, normalisation et défuzzification. La section 3 décrit en détail le processus de correspondance entre les paramètres d'entrée et le CR.
- Afin d'optimiser les performances de la méthode proposée et de s'affranchir de l'intervention d'un expert pour la configuration des paramètres de l'ANFIS, quatre algorithmes d'optimisation méta-heuristique (PSO, FA, ICA et HBBO) sont utilisés pour ajuster les paramètres clés du modèle. Il s'agit notamment de la moyenne et de la variance des fonctions d'appartenance gaussiennes, ainsi que des constantes ( $p_i$ ,  $q_i$  et  $r_i$ ). La figure V.12 illustre ce processus. Une fois les critères d'arrêt du processus de réglage atteints (notamment le nombre d'itérations), le modèle ANFIS est considéré comme opérationnel et prêt à être appliqué.

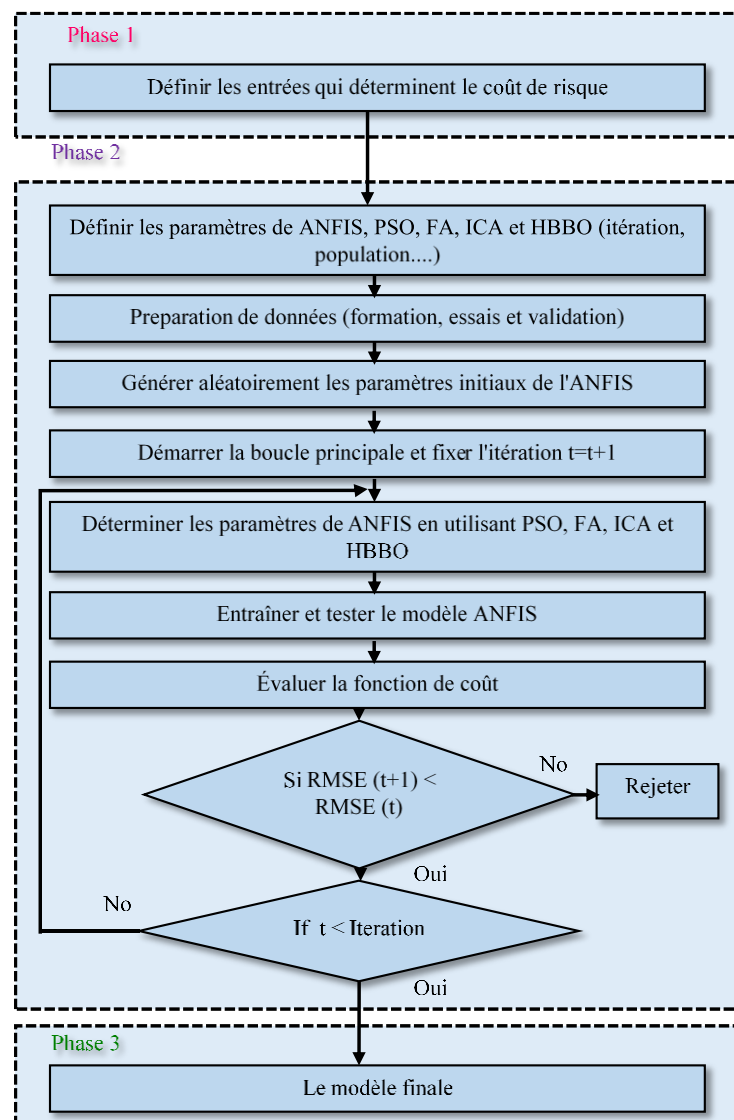


Figure V.11 Principales étapes de l'ANFIS pour déterminer la valeur CR.

Tableau V.9 Critères de définition des valeurs de CR sur un réseau de transport routier urbain.

Entrées	Description
Coûts d'exploitation du transporteur (X1 ∈ [0,7500])	Le coût du transporteur est principalement calculé en fonction du temps, de la distance, du coût du carburant, etc. Dans cette étude, le coût d'exploitation du transporteur est estimé en fonction de la longueur de la route [180].
Réponse des pompiers (X2 ∈ [0,15])	L'intervention des pompiers dépend principalement de la distance parcourue (Lij) ainsi que des coûts de transport (c), tels que la consommation de carburant. Le coût associé est alors donné par le produit : Lij* c. Le temps d'intervention des pompiers correspond au délai nécessaire pour que les services d'urgence atteignent le lieu de l'accident. Dans cette étude, le temps de réaction moyen est exprimé en minutes et dépend directement de la distance séparant le centre de secours du site de l'accident.
Pertes liées à l'environnement (X3 ∈ [0,5])	C'est le nombre de points critiques de l'environnement (cours d'eau, zones urbaines, zones agricoles, fragments de forêt) susceptibles d'être affectés par l'accident. Seuls les points situés à moins de 800 mètres du lieu de l'accident sont pris en compte [181].
Risque d'accident (X4 ∈ [0,1])	Le risque d'accident est évalué en fonction de plusieurs facteurs : le nombre d'accidents enregistrés sur la route concernée au cours des dix dernières années (f 1), le nombre de branches ou d'intersections (f 2), le pourcentage de véhicules lourds dans le trafic (f 3), et le niveau de signalisation (f 4). Le risque total d'accident (X 4) est calculé à l'aide de l'équation suivante : " $X4 = 0,3 f1/ f1max + 0,2 f2/ f2max + 0,2 f3/ f3max + 0,3 f4/ f4max$ ". La valeur de f4 est attribuée selon le niveau de signalisation, défini comme suit : 1 - simples règles de circulation, 2 - réglementation au moyen de panneaux de signalisation, 3 - réglementation au moyen de signaux lumineux.
La gravité liée à un accident (X5 ∈ [0,9500])	Il est déterminé en fonction de la population affectée résidant dans les environs de la zone de l'accident. La zone de contrôle est définie selon les mêmes critères que ceux utilisés pour le facteur X3.
Pertes liées aux points stratigraphiques (X6 ∈ [0,10])	Le risque lié aux points stratégiques correspond au nombre d'infrastructures critiques situées à proximité du lieu de l'accident (telles que chemins de fer, lignes électriques, installations industrielles, commerciales ou de transport, écoles, hôpitaux, etc.).
Risque d'attaque terroriste/de détournement (X7 ∈ [1,5])	Le risque d'attaque terroriste correspond aux conséquences potentielles d'un acte terroriste dans la zone de contrôle. Ce risque est évalué à l'aide de l'échelle suivante : 1 – très faible, 2 – faible, 3 – modéré, 4 – élevé, 5 – très élevé.

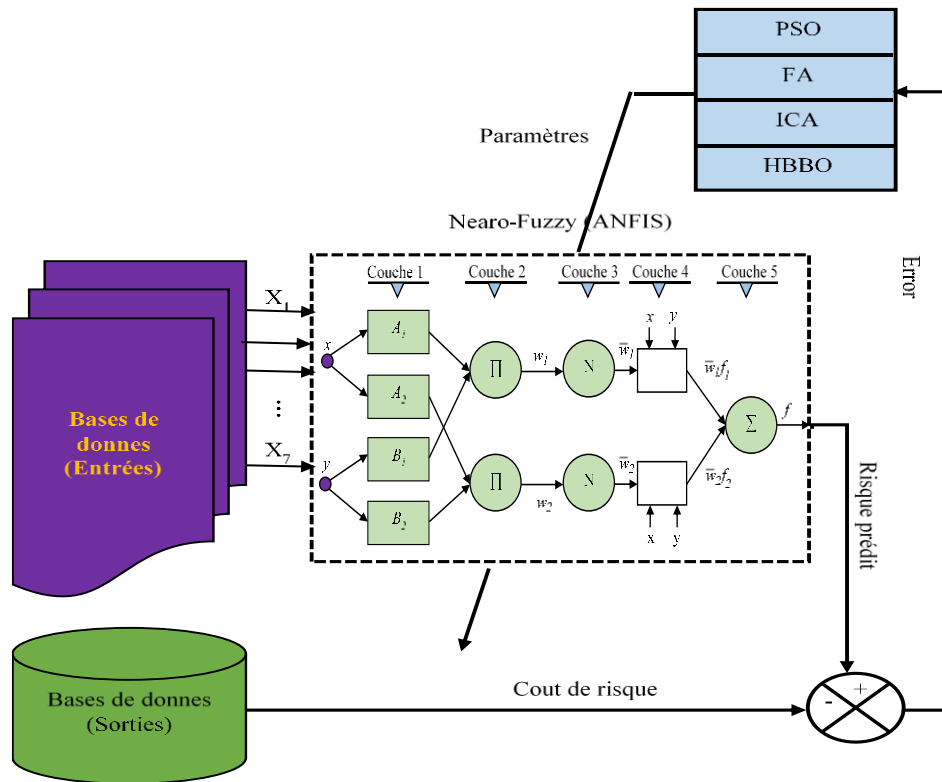


Figure V.12 ANFIS basés sur PSO, FA, ICA et HBBO

Afin de valider et d'évaluer la performance du modèle ANFIS, nous avons utilisé les données issues d'une étude portant sur la distribution du pétrole et de ses dérivés à Belgrade, en Serbie (cette étude a pour but de déterminer la meilleure trajectoire). Cette étude a été réalisée sur un réseau routier d'une longueur totale de 863 km, en ne considérant que les segments de routes présentant une largeur minimale de 5 km. Dans ce réseau, le transport des produits pétroliers s'effectue depuis la raffinerie de Pancevo (POI) jusqu'à une station-service NIS (voir Figure V.13). Les données relatives aux paramètres d'entrée et de sortie pour chaque branche reliant les stations NIS à la raffinerie POI ont été extraites à partir des informations sur la qualité environnementale de la ville de Belgrade en 2013, ainsi que du plan urbain général de Belgrade couvrant la période allant jusqu'à 2021 (voir Tableau V.9).

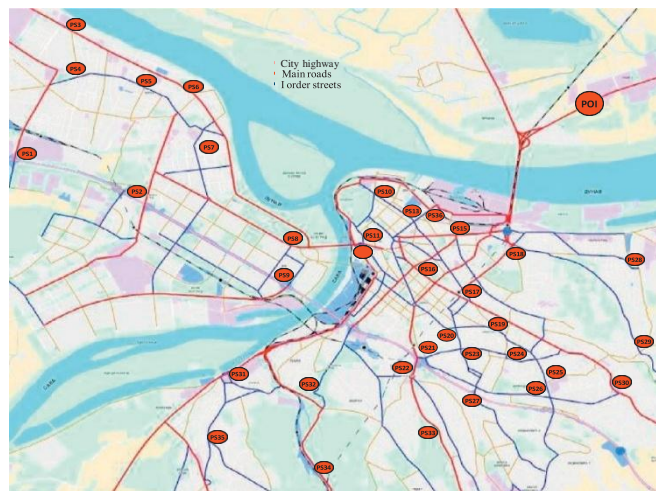


Figure V.13 Le chemin qui relie le POI aux stations NIS [155]

Dans ce travail, un système flou classique a été mis en place sur la base de l'algorithme de regroupement Fuzzy C-Means. L'ensemble des traitements et modélisations a été réalisés à l'aide du logiciel MATLAB et de ses outils associés. Sept caractéristiques ont été utilisées pour estimer la valeur du CR : le coût d'exploitation du transporteur, l'intervention d'urgence, les pertes environnementales, le risque d'accident, les conséquences d'un accident, les pertes liées aux infrastructures, et le risque d'attaque terroriste. Pour l'apprentissage du modèle, 70 % des données ont été sélectionnées aléatoirement pour l'étape d'entraînement, tandis que les 30 % restantes ont été utilisées pour la validation. La structure floue de Takagi-Sugeno a été appliquée en s'appuyant sur le clustering Fuzzy C-Means, avec une partition en 15 classes pour la variable CR. Enfin, 250 candidats et 1000 itérations ont été utilisés pour tester les algorithmes proposés. Le tableau V.10 rapporte les paramètres des algorithmes proposés.

Tableau V.10 Les paramètres des algorithmes proposés.

Paramètres	PSO	FA	ICA	HBBO
w	0.7	/	/	/
c <sub>1</sub>	1	/	/	/
c <sub>2</sub>	2	/	/	/
γ	/	1	0.1	/
β <sub>0</sub>	/	2	/	/
α	/	0.98*0.2	1	/
N <sub>emp</sub>	/	/	50	/
β	/	/	1.5	/
pc	/	/	0.05	/
ξ	/	/	0.2	/
N <sub>fields</sub>	/	/	/	50
K1	/	/	/	0
K2	/	/	/	2.5
σ	/	/	/	0.2

Fondamentalement, lorsqu'un nouveau modèle hybride est proposé, sa performance doit être évaluée à la fois lors des phases d'apprentissage et de validation. La phase d'apprentissage permet d'apprécier la capacité du système à s'adapter aux données, tandis que la phase de test (ou de validation) mesure la capacité prédictive du modèle proposé [182].

Dans la présente étude, l'erreur quadratique moyenne (MSE) et la racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) ont été utilisées pour évaluer la performance de l'algorithme méta-heuristique proposé et pour estimer la valeur du CR le long d'un ensemble donné de liaisons routières. L'erreur quadratique moyenne est calculée selon la formule suivante [183] :

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (X_{\text{test}} - X_{\text{obs}})^2 \quad (\text{V.14})$$

Avec,  $X_{\text{test}}$  est la valeur prédite par ANFIS,  $X_{\text{obs}}$  indique la valeur observée, et N représente le nombre de données observées.

Les résultats de la simulation numérique de l'ANFIS basé sur PSO, FA, HBBO et ICA sont représentés dans les figures V.14 à V.21 pour les données d'essai et d'entraînement.

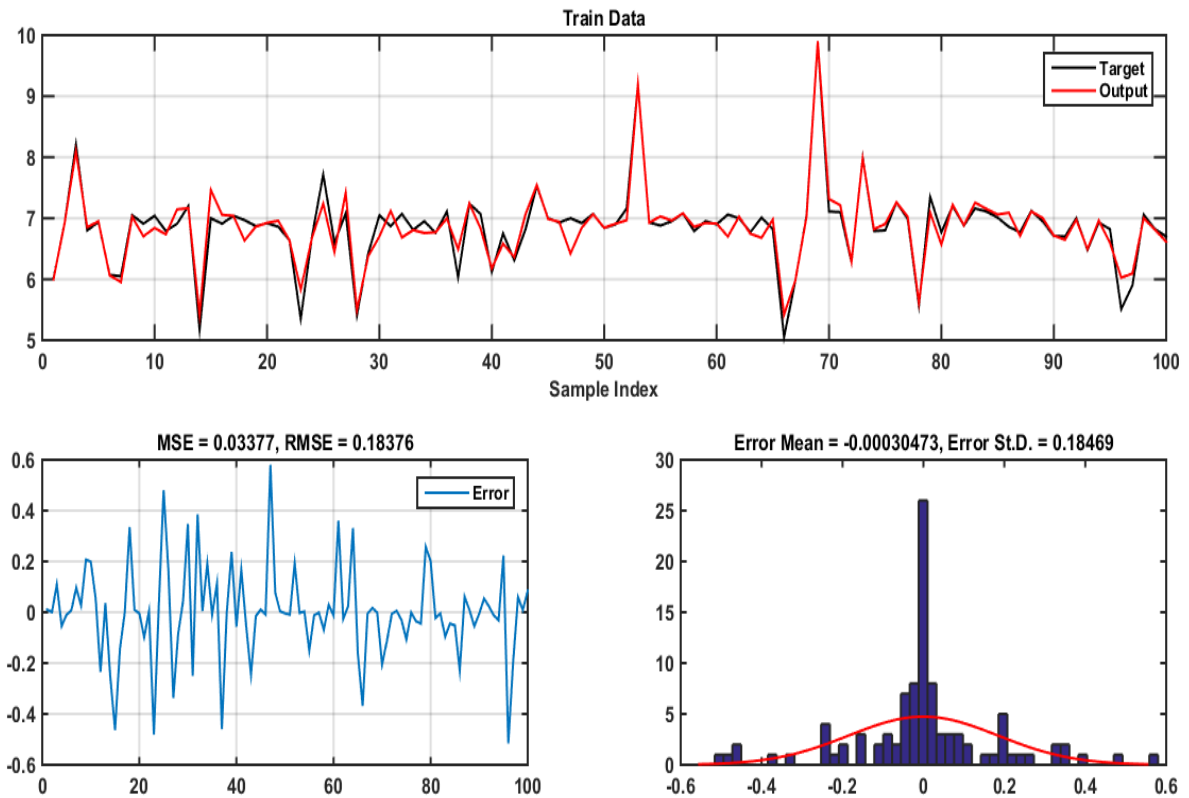


Figure V.14 Les résultats de l'ANFIS-PSO de la valeur CR pour les données d'apprentissage

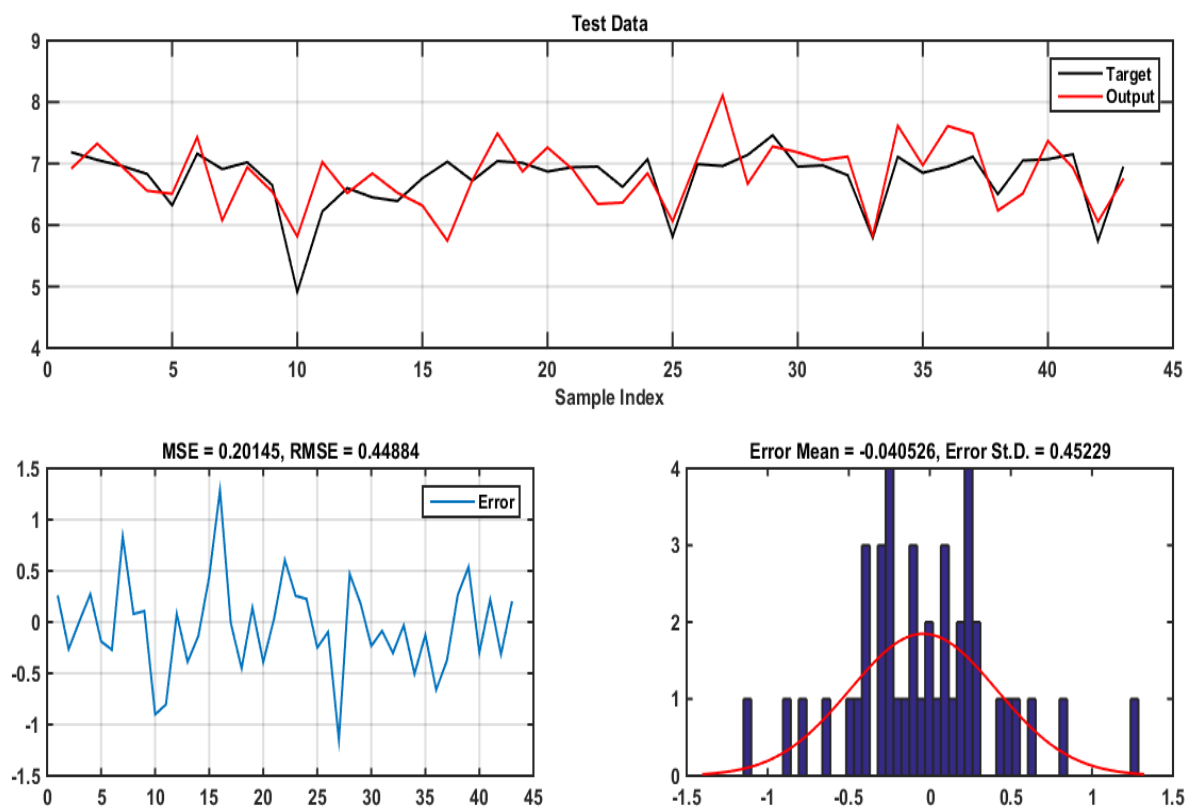


Figure V.15 Les résultats de l'ANFIS-PSO de la valeur CR pour les données d'essai

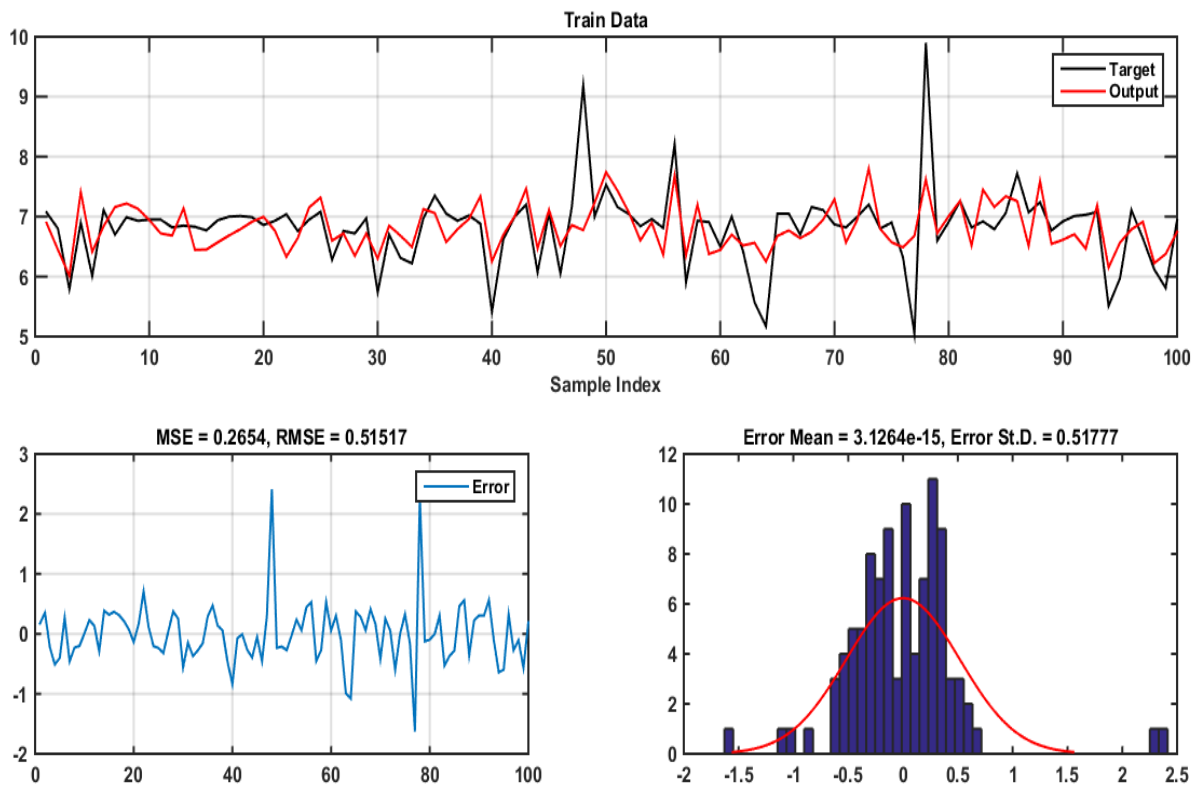


Figure V.16 Les résultats de l'ANFIS-FA de la valeur CR pour les données d'apprentissage

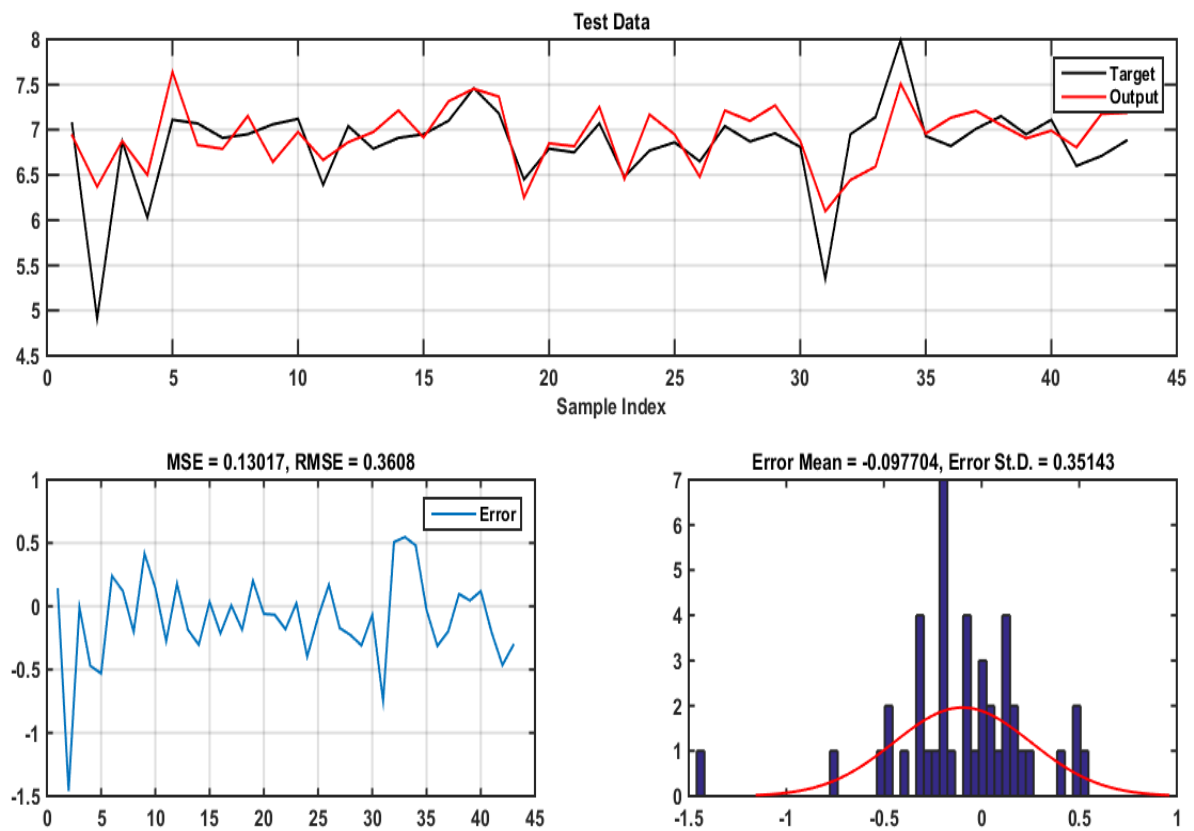


Figure V.17 Les résultats de l'ANFIS-FA de la valeur CR pour les données d'essai

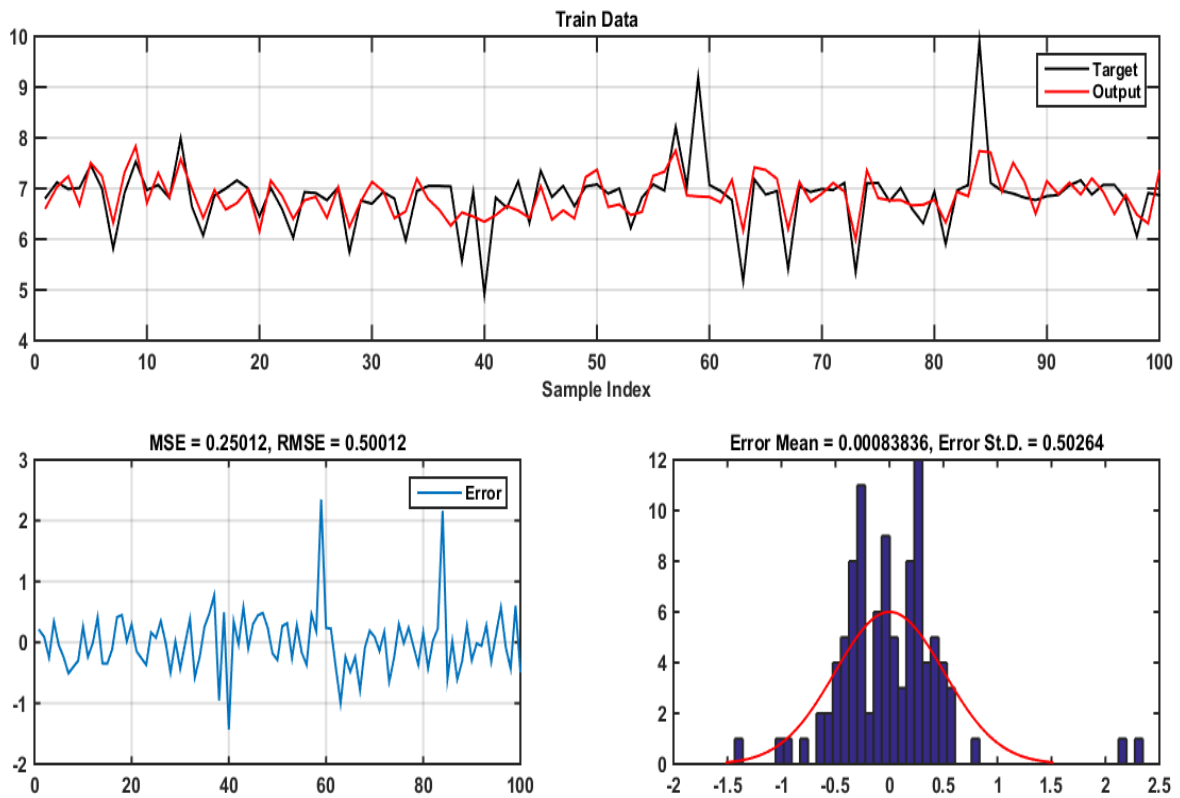


Figure V.18 Les résultats de l'ANFIS-HBBO de la valeur CR pour les données d'apprentissage

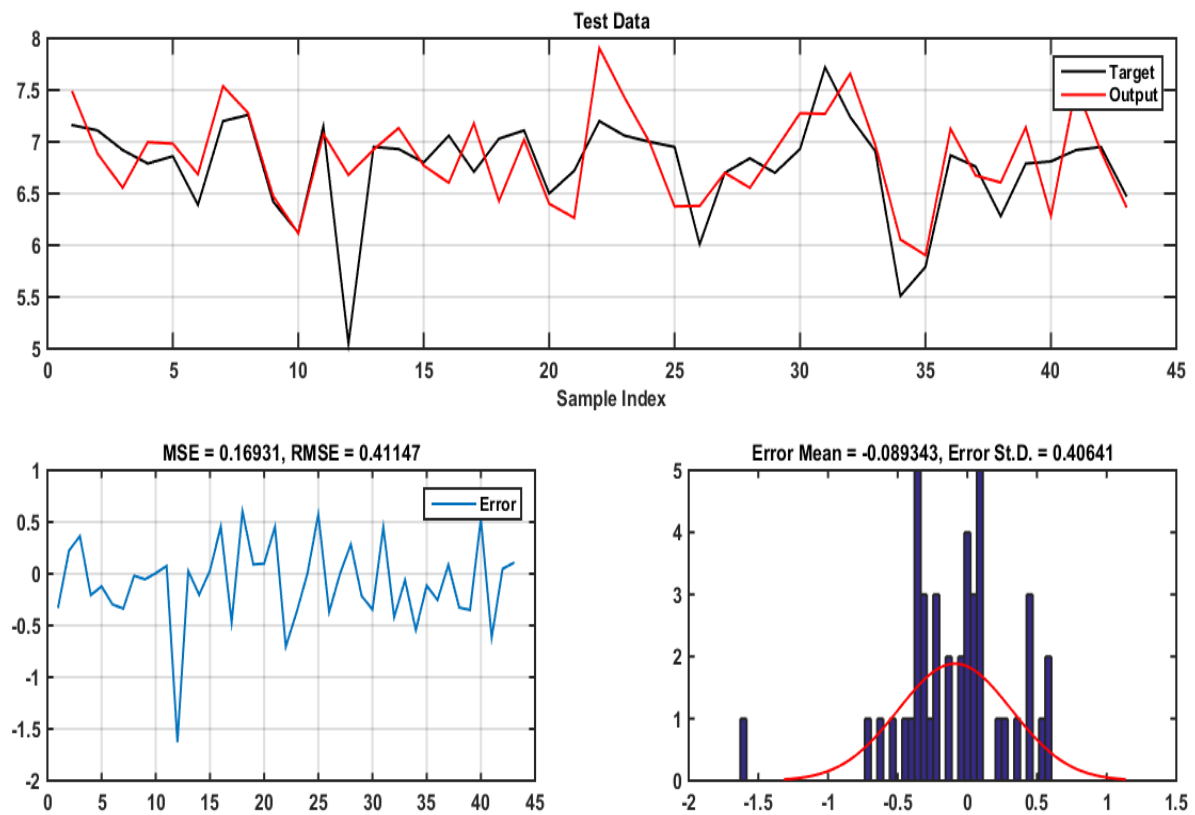


Figure V.19 Les résultats de l'ANFIS-HBBO de la valeur CR pour les données d'essai

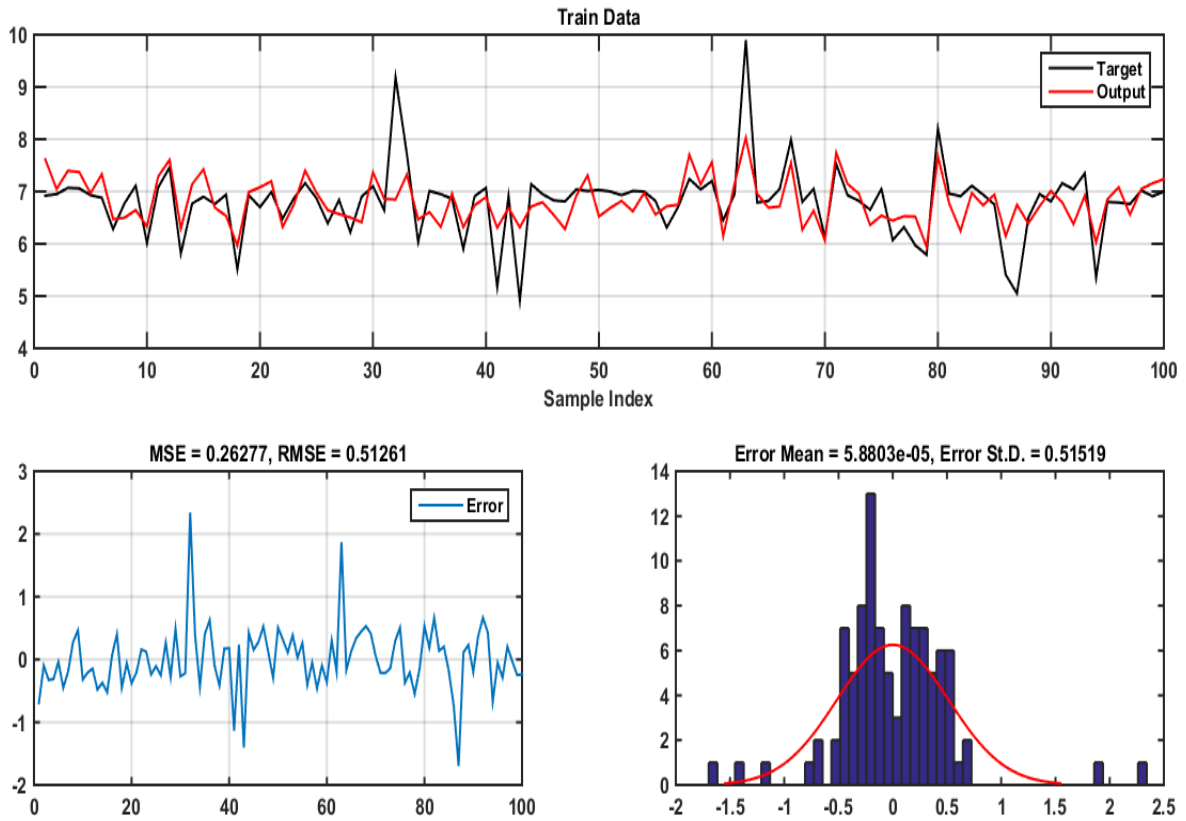


Figure V.20 Les résultats de l'ANFIS-ICA de la valeur CR pour les données d'apprentissage

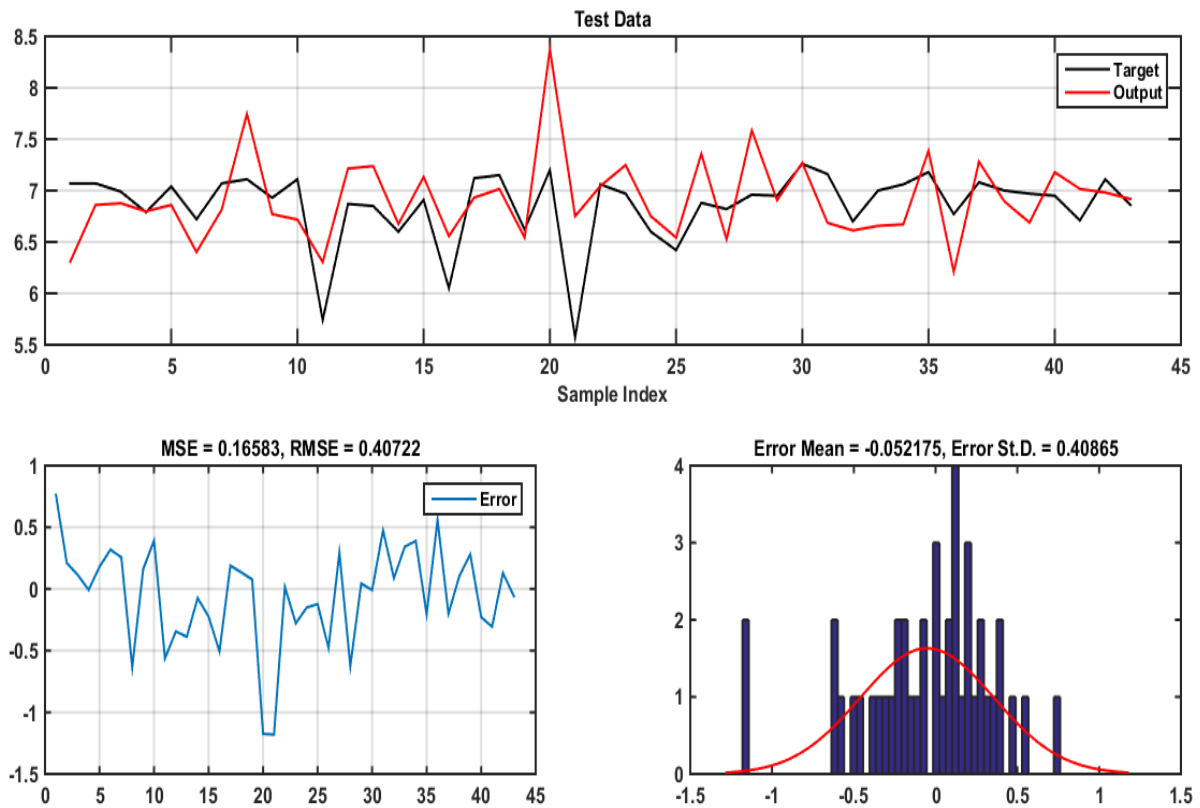


Figure V.21 Les résultats de l'ANFIS-ICA de la valeur CR pour les données d'essai

Les Figures V.14 et V.15 présentent les résultats obtenus par le modèle ANFIS optimisé par PSO, pour les phases d'apprentissage et de test. Ces résultats démontrent une précision élevée, avec un MSE de 0,033 et un RMSE de 0,183 en phase d'apprentissage, et un MSE de 0,201 et un RMSE de 0,448 en phase de test.

Les performances du modèle ANFIS-FA sont illustrées dans les Figures V.16 et V.17, où les courbes des données estimées sont comparées aux valeurs cibles. Lors de l'apprentissage, le modèle atteint un MSE de 0,265 et un RMSE de 0,515. En phase de test, ces valeurs diminuent à 0,13 pour le MSE et 0,36 pour le RMSE, ce qui confirme que l'ANFIS-FA offre de bonnes capacités de généralisation et de suivi.

Les Figures V.18 et V.19 montrent les résultats du modèle ANFIS-HBBO. Celui-ci s'adapte avec précision aux données cibles. L'analyse de la distribution de l'erreur révèle qu'elle suit une loi normale, avec une moyenne de 0,0008 et un écart-type (STD) de 0,5 en phase d'apprentissage, et une moyenne de -0,089 et un écart-type de 0,4 en phase de test.

Enfin, les Figures V.20 et V.21 illustrent la réponse du modèle ANFIS-ICA comparée aux valeurs cibles du critère CR. Les résultats montrent que les prédictions sont très proches des valeurs attendues, indiquant une bonne précision globale du modèle.

Les valeurs du RMSE et du MSE restent inférieures à 1 dans toutes les prédictions, ce qui témoigne d'une excellente performance globale des modèles. Cela confirme que les techniques hybrides mises en œuvre sont adaptées à la prévision de la valeur du critère CR.

Cependant, bien que les résultats obtenus soient globalement satisfaisants, la comparaison des Figures V.14 à V.21 révèle des différences notables dans les niveaux d'erreur de prédiction entre les différentes approches. Selon ces figures, le modèle ANFIS présente les erreurs moyennes (MSE et RMSE) les plus faibles avec l'algorithme PSO en phase d'apprentissage, et avec l'algorithme FA en phase de test.

La combinaison de la logique floue et des réseaux de neurones artificiels avec les techniques d'optimisation PSO, FA, HBBO et ICA améliore la capacité du modèle à traiter les relations non linéaires complexes présentes dans les données, tout en réduisant le risque de convergence vers des minima locaux.

Afin de tester la robustesse et la flexibilité du modèle développé nous l'avons entraîné à l'aide des données issues de NAFTA. Figures 22 et 23 illustrent les performances du système proposé.

Les résultats présentés dans les figures 22 et 23 confirment que les données obtenues à l'aide d'ANFIS suivent fidèlement les données collectées, et que la distribution des erreurs est presque centrée sur 0.

Pour aller plus loin dans l'évaluation, nous avons calculé le MSE, le MAE et le RMSE pour les phases d'apprentissage et de test. Ces indicateurs, toujours inférieurs à 1, attestent que le modèle pourrait être utilisé dans le cadre du TRMD.

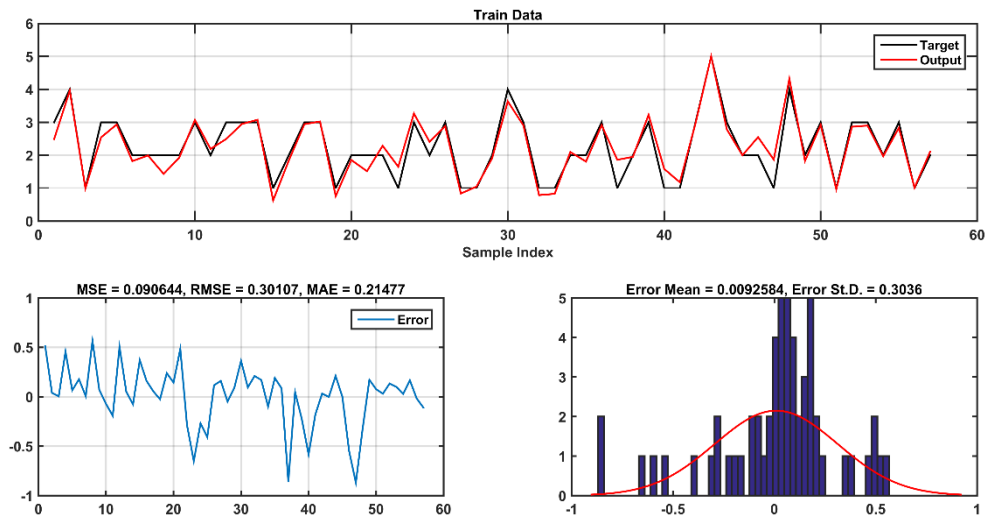


Figure V.24 Les résultats de l'ANFIS-PSO pour la phase d'apprentissage.

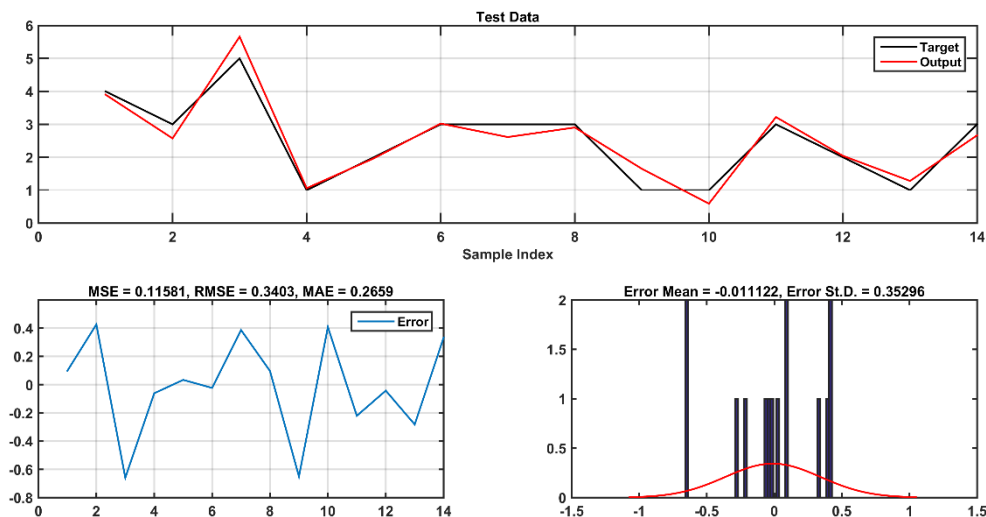


Figure V.23 Les résultats de l'ANFIS-PSO pour la phase de test.

#### V.4. Conclusion

Dans ce chapitre, le modèle ANFIS a été conçu et simulé avec succès en utilisant quatre approches méta-heuristiques : PSO, FA, ICA et HBBO. Cette approche a été développée dans le but de prédire la concentration de fuites de dioxyde de soufre ( $\text{SO}_2$ ) dans l'atmosphère, et ainsi d'estimer le coût du risque lié au transport routier de matières dangereuses.

Le modèle proposé s'est avéré plus performant que les approches déterministes traditionnelles dans plusieurs aspects : il permet de gérer efficacement les incertitudes, de se passer de l'intervention directe d'un expert, d'analyser en profondeur les critères influençant la valeur du risque, de s'adapter aux variations de ces critères dans l'environnement, et de bénéficier d'un apprentissage optimisé via divers algorithmes d'optimisation. De plus, les

algorithmes utilisés sont capables de maintenir une précision élevée même en présence de fonctions à forte dimensionnalité, tout en contournant les minima locaux.

Par ailleurs, un système flou a été conçu pour évaluer la sévérité des effets des substances dangereuses sur la santé humaine. Les résultats de simulation ont confirmé l'efficacité des approches proposées. L'analyse comparative des performances montre que le modèle ANFIS offre une précision globale élevée, avec une supériorité de l'ANFIS-PSO en phase d'apprentissage, tandis que l'ANFIS-FA affiche les meilleurs résultats en phase de test.

## **Conclusion Générale**

## **Conclusion Générale**

Dans le cadre de cette thèse, nous avons proposé une étude quantitative du risque lié à l'acheminement de matières dangereuses par voie routière. Cette étude s'est concentrée sur l'intégration de méthodes issues de l'intelligence artificielle et de la gestion des risques. L'objectif est de fournir des données précises et d'établir un cadre global prenant en compte les principales difficultés du problème, telles que le caractère mobile et diffus de TRMD, le manque de données et la nature incertaine ou floue de ces données.

Dans un premier temps, nous avons réalisé une étude bibliographique des éléments théoriques relatifs aux risques associés au TRMD. Cette recherche a été suivie d'une présentation du cadre légal applicable à la gestion de ce type de transport en Algérie. Cette étude offre un aperçu global du processus de gestion des risques, dans le but d'optimiser et de garantir la sécurité du transport de ces matières.

Dans un second temps, nous avons mis en avant les notions fondamentales liées aux risques, à la sécurité et à la gestion des risques, ainsi que la stratégie générale de gestion des risques, incluant les principales techniques quantitatives, semi-quantitatives et qualitatives. Une description théorique des différentes méthodes d'analyse appliquées dans le cadre de ce travail a également été réalisée. Enfin, une présentation générale des méthodes couramment utilisées en intelligence artificielle notamment la logique floue, les réseaux de neurones et les algorithmes d'optimisation méta-heuristiques (PSO, FA, ICA et HBBO) a été fournie dans le troisième chapitre.

Dans le quatrième chapitre, en nous appuyant sur les forces et faiblesses de chaque technique, nous avons introduit une approche intégrée reposant sur trois volets. La première approche, l'arbre de défaillance, vise à identifier les événements de base nécessaires à l'apparition de l'événement indésirable. La deuxième approche permet de pondérer l'avis de chaque expert invité pour choisir la valeur floue associée à l'apparition de chaque événement de base, en s'appuyant sur des critères tels que l'âge, l'expérience, le niveau d'études et la position professionnelle. La troisième approche consiste à évaluer le risque lié au trafic de matières dangereuses en tenant compte de la nature de la matière transportée, du lieu et du type d'accident.

Cette méthode hybride nous a permis de recenser un grand nombre de scénarios susceptibles de provoquer l'incident redouté, de calculer la probabilité de cet événement en utilisant les connaissances des experts, l'équation d'Onisawa et l'algèbre de Boole, et de déterminer le risque de transport de matières dangereuses en prenant en considération le caractère mobile et diffus des TRMD.

Cependant, il est important de souligner que cette méthode est laborieuse, demande beaucoup de temps et requiert une expertise approfondie. De plus, l'utilisation des portes logiques dans l'arbre de défaillance (portes ET/OU) ne reflète pas toujours parfaitement la réalité.

Enfin, dans le cinquième chapitre, nous avons appliqué une nouvelle méthode basée sur la logique floue et les réseaux de neurones adaptatifs (ANFIS) pour l'étude du TRMD. Afin d'optimiser les performances de cette approche, ses paramètres ont été ajustés à l'aide d'algorithmes méta-heuristiques tels que PSO, FA, ICA et HBBO. Cette méthode permet d'estimer la concentration de la matière dangereuse dans l'atmosphère ainsi que le coût du risque associé au TRMD.

Le modèle proposé présente trois avantages principaux par rapport aux autres méthodes. Premièrement, il peut intégrer une grande variété de critères de décision grâce à sa flexibilité,

notamment via la possibilité d'ajuster la base de règles floues. Ces règles d'inférence floues sont essentielles pour la gestion du transport de matières dangereuses, particulièrement dans une approche descriptive favorisant une recherche intuitive et heuristique de solutions lors du processus d'acheminement. Cette flexibilité permet au modèle de dépasser les limites des méthodes d'évaluation classiques, qui se contentent souvent d'agréger les résultats des critères de manière hiérarchique. Deuxièmement, le système est performant en conditions d'incertitude, ce qui en fait un outil précieux pour aider les décideurs à analyser le risque d'accident. Troisièmement, le modèle peut être déployé sous forme de système informatisé, ce qui facilite le soutien aux processus décisionnels dynamiques liés à l'acheminement des matières dangereuses. Ainsi, le modèle proposé permet une évaluation rapide et objective des facteurs de risque, même dans des conditions de transport variables.

Bien que les résultats soient satisfaisants, la complexité et la précision du modèle peuvent être influencées par le choix des prédicteurs (entrées) ainsi que par la nature et la qualité des données utilisées. Il a été constaté que les données collectées lors de nombreux accidents comprennent généralement différents types d'informations : numériques, catégorielles et textes non structurés. Ces derniers représentent une forme de données particulièrement difficile à traiter, car leur prétraitement requiert un effort humain important, qui reste un élément central dans le processus décisionnel. Par ailleurs, les erreurs présentes dans les données peuvent entraîner une diminution de la précision des prédictions.

En outre, un autre problème majeur concerne la sélection des caractéristiques. Lorsque le nombre d'attributs est très élevé, la complexité des calculs augmente considérablement, ce qui ralentit le traitement. De plus, certains attributs peuvent ne pas avoir d'impact significatif sur la variable de sortie, ce qui peut nuire à la capacité prédictive du modèle proposé.

Dans ce contexte, les travaux futurs devraient se concentrer sur l'analyse et l'évaluation de différents algorithmes capables de traiter les textes non structurés par exemple, la modélisation thématique. Ils devraient également explorer des approches avancées de sélection des caractéristiques, telles que les méthodes basées sur l'intelligence en essaim, afin d'optimiser la performance des modèles prédictifs.

# **Bibliographie**

## Bibliographie

- [1] Gossel, S. (2009). Guidelines for Chemical Transportation Safety, Security, and Risk Management. *Chemical Engineering*, 116(9), pp. 8-10.
- [2] Goel, A. (2010). The value of in-transit visibility for supply chains with multiple modes of transport. *International Journal of logistics: research and Applications*, 13(6), pp. 475-492. <https://doi.org/10.1080/13675567.2010.482522>.
- [3] Center for Chemical Process Safety, Guidelines for Investigating Chemical Process Incidents, Second Edition, American Institute of Chemical Engineers. New York, 2003.
- [4] Raymundo, H., & Reis, J. G. M. D. (2018). Measures for passenger-transport performance evaluation in urban areas. *Journal of Urban Planning and Development*, 144(3), pp. 04018023. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)UP.1943-5444.0000461](https://doi.org/10.1061/(ASCE)UP.1943-5444.0000461).
- [5] Liu, L., Wu, Q., Li, S., Li, Y., & Fan, T. (2021). Risk assessment of hazmat road transportation considering environmental risk under time-varying conditions. *International journal of environmental research and public health*, 18(18), pp. 9780. <https://doi.org/10.3390/ijerph18189780>.
- [6] Koçar, O., & Dizdar, E. (2022). A risk assessment model for traffic crashes problem using fuzzy logic: a case study of Zonguldak, Turkey. *Transportation letters*, 14(5), pp. 492-502. <https://doi.org/10.1080/19427867.2021.1896062>.
- [7] Ma, T., Wang, Z., Yang, J., Huang, C., Liu, L., & Chen, X. (2022). Real-time risk assessment model for hazmat release accident involving tank truck. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 77, pp. 104759. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2022.104759>.
- [8] Xu, Y., Hu, H., Zhu, X., Nan, Y., Wang, K., Liu, Z., & Lian, S. (2024). RAOD: A Benchmark for Road Abandoned Object Detection from Video Surveillance. *IEEE Access*. 10.1109/ACCESS.2024.3407955.
- [9] Li, S., Xing, J., Yang, L., & Zhang, F. (2020). Transportation and the environment in developing countries. *Annual Review of Resource Economics*, 12(1), pp. 389-409. <https://doi.org/10.1146/annurev-resource-103119-104510>.
- [10] Erkut, E., Tjandra, S. A., & Verter, V. (2007). Hazardous materials transportation. *Handbooks in operations research and management science*, 14, pp. 539-621. [https://doi.org/10.1016/S0927-0507\(06\)14009-8](https://doi.org/10.1016/S0927-0507(06)14009-8).
- [11] Journal. Officiel de la république algérienne du 12 novembre 1963 pp. 1146.
- [12] Journal. Officiel de la république algérienne du 16 juin 1964 p 74 et pp. 637.
- [13] Journal. Officiel de la république algérienne du 12 mars 1965 pp. 233.
- [14] Journal. Officiel de la république algérienne du 4 août 1967 pp. 642.
- [15] Journal. Officiel de la république algérienne du 28 août 1985 p 832.
- [16] Journal. Officiel de la république algérienne N°10 du 7 mars 1990 p 320.
- [17] Journal. Officiel de la république algérienne N°44 du 8 août 2001 p 3.
- [18] Journal. Officiel de la république algérienne N°46 du 19 août 2001 p 4.
- [19] Codes des transports, code maritime, code de l'aviation civile, codes des transports terrestres, code de la route, 1ère édition, BERTI Editions, Alger 2003. P651 et 699.
- [20] TOUAFEK Rabah, code des transports urbains et de circulation routière, textes législatifs et réglementaires en vigueur. Editions Houma, 2006. Pp. 15.
- [21] Journal. Officiel de la république algérienne N°75 du 7 décembre 2003 pp. 7.
- [22] Document d'information édité par le ministère de l'Écologie et du Développement durable, direction de la Prévention des pollutions et des risques, sous-direction de la Prévention des risques majeurs. Conception et réalisation : Alp'Géorisques [38420 Domène], IRMA - Institut des risques majeurs [38000 Grenoble], Graphies [38240 Meylan] Décembre 2002. [http://www.prim.net/actu/archives/transp\\_mat\\_dang.html](http://www.prim.net/actu/archives/transp_mat_dang.html) : page spécifique du site du ministère de l'Écologie et du Développement durable traitant du risque TMD.

- [23] Murphy, J. F. (2017). Safety considerations in the chemical process industries. *Handbook of Industrial Chemistry and Biotechnology*, pp. 1805-1887. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-52287-6\\_34](https://doi.org/10.1007/978-3-319-52287-6_34).
- [24] Rapport d'étude N°INERIS-DRA-2006-P46055-CL47569, formalisation du savoir et des outils dans le domaine des risques majeurs (Dra-35) étude de danger d'une installation classe.Ω 9.
- [25] Zheng, X., & Wang, S. (2014). Study on the method of road transport management information data mining based on pruning eclat algorithm and mapreduce. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 138, 757-766. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2014.07.254>.
- [26] Sakhapov, R. L., Nikolaeva, R. V., Gatiyatullin, M. H., & Makhmutov, M. M. (2016, August). Risk management model in road transport systems. In *Journal of Physics: Conference Series V*. 738, No. 1, pp. 012008. IOP Publishing. 10.1088/1742-6596/738/1/012008.
- [27] IEC 61508 standard. "Functional safety of electrical/ electronic/ programmable electronic safety-related systems- Parts 1 to 7," International Electrotechnical Commission, Geneva, Switzerland, 2010.
- [28] CEI 60300-3-9 standard. "Gestion de la sûreté de fonctionnement-Partie 3: Guide d'application-Section 9: Analyse du risque des systèmes technologiques", Commission électrotechnique internationale, Ed.1, pp. 67, Geneva, Switzerland,1995.
- [29] ISO/CEI Guide 51. "Aspects liés à la sécurité — Principes directeurs pour les inclure dans les normes," ISO/CEI , Ed.3, 16 pages, Avril 2014.
- [30] OHSAS 18001, Occupational health and safety management systems - specification. British Standards Institute (BSI), England, 1999.
- [31] J. C. Laprie et al., Guide de la Sûreté de Fonctionnement, 324 pages, Cépaduès Editions, Toulouse, France, 1995.
- [32] J. Guiochet, "Safety management of service robot systems-UML approach based on system risk analysis." PhD thesis, Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, France, 2003.
- [33] N. Margossian, Risques et accidents industriels majeurs: Caractéristiques, réglementation, prévention. Collection : Technique et ingénierie, Dunod, 280 pages, Jan. 2006.
- [34] N.G. Leveson, *Safeware: system safety and computers*. Addison-Wesley, Reading, MA, 680 pages , 1995.
- [35] D. Macdonald, *Practical industrial safety, risk assessment and shutdown systems*. Elsevier, 384 pages, ISBN: 9780750658041, 2003. <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-5804-1.X5000-9>.
- [36] M. Fumey, "Méthode d'évaluation des risques agrégés: application au choix des investissements de renouvellement d'installations," PhD thesis, Institut National Polytechnique de Toulouse, France, 2001.
- [37] C. Morneau, "La gestion des risques d'accidents industriels majeurs: état de la situation sur le territoire de la pointe-de-l'île," CSSS de la Pointe-de-l'île, 67 pages , 2011.
- [38] Y. Bai and W.-L. Jin, Chapter 38 - Risk Assessment Methodology. In: Bai, Y. & Jin, W.-L. (eds.) *Marine Structural Design (2nd ed.)*. Oxford: Butterworth-Heinemann, pp. 709–723, 2016.
- [39] M. Rausand, *Risk assessment: theory, methods, and applications*, vol. 115, John Wiley & Sons, 635 pages, 2013. ISBN: 1118281101.
- [40] F. Innal, "Contribution à la modélisation des systèmes instrumentés de sécurité et à l'évaluation de leurs performances: analyse critique de la norme CEI 61508." PhD thesis, Université Bordeaux 1, France, 2008.
- [41] H. Dezfuli, A. Benjamin, C. Everett, C. Smith, M. Stamatelatos, and R. Youngblood, "Nasa system safety handbook. volume 1; system safety framework and concepts for implementation," National Aeronautics and Space Administration, vol. 1, 102 pages, Washington, États-Unis, Nov.2011.
- [42] ISO 31000 standard. "Risk management," International Organization for Standardization, Ed. 2, 16 pages, 2018.

- [43] INERIS, Outils d'analyse des risques générés par une installation industrielle. Mai 2003. Kirchsteiger C. On the use of probabilistic and deterministic methods in risk analysis, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 12. PP. 399-419.1999.
- [44] Anderson, R.D., Sweeney, J.D., Williams, A.T., *Statistics for Business and Economic* 7e, South-Western College Publishing, Ohio, 1999.
- [45] Arens, A.A., Elder, J.R., Beasley, S.M., *Auditing and Assurance Services. An integrated Approach*, 11th Edition, Pearson Education, Inc., New Jersey, 2006.
- [46] Bennett, J. C., Bohoris, G. A., Aspinwall, E. M., & Hall, R. C. (1996). Risk analysis techniques and their application to software development. *European Journal of Operational Research*, 95(3), pp. 467-475. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(96\)00171-3](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(96)00171-3).
- [47] Pollard, S. J., Strutt, J. E., MacGillivray, B. H., Hamilton, P. D., & Hrudey, S. E. (2004). Risk analysis and management in the water utility sector: a review of drivers, tools and techniques. *Process Safety and Environmental Protection*, 82(6), 453-462. <https://doi.org/10.1205/psep.82.6.453.53207>.
- [48] Sellami, I. (2019). Contribution à l'Analyse Quantitative des Risques Industriels: Application à l'Industrie des Procédés (Doctoral dissertation, Université de Batna 2-Mostefa Ben Boulaïd).
- [49] Genete, Laura-Diana, Modelling Accounting Risk in Audit with Belief Function. Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=1114851> or <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.1114851>.
- [50] Atiso, F., Koranteng, E., & Boakye, B. Y. (2020). The Effects of Financial Risk Management Practices on Financial Performance of Rural Banks in Ghana: A Case of Akuapem Rural Bank. In 12th International Scientific Conference on Business and Economics” November pp. 4-5.
- [51] Genete, D. (2007). Using Information Technologies in Financial Audit for Risk Related Accounting Evaluation. Romania Case Study. *Information Management in the Networked Economy* (8th IBIMA), pp. 20-22.
- [52] McNeil, J.A., Frey, R., Embrechts, P., *Quantitative Risk Management. Concepts, Techniques and Tools*, T&T Productions Ltd., London, 2005.
- [53] Sentz, K., & Ferson, S. (2002). Combination of evidence in Dempster-Shafer theory. <https://doi.org/10.2172/800792>.
- [54] Srivastava, P., R., A General Scheme for Aggregating Evidence in Auditing: Propagation of Beliefs in Networks, in Vasarhelyi, A., M., (editor) *Artificial Intelligence in Accounting and Auditing*, Vol. 3, Wiener Publisher, Princeton, 1995.
- [55] Srivastava, P., R., Mock, J., T., *Introduction to Belief Function*, în *belief Functions in Business Decisions*, Physica-Verlag, Hiedelberg, 2002, pp. 2.
- [56] Stoneburner, G., Goguen, A., & Feringa, A. (2002). Risk management guide for information technology systems. *Nist special publication*, 800(30), pp. 800-30.
- [57] Srivastava, P., R., Shafer, R., G., *Belief Function Formulas for Audit Risk*, *The Accounting Review*, Vol. 67, Nr. 2, pp. 1992.
- [58] United States General Accounting, *Information Security Risk Assessment Practices of Leading Organizations*, 1998, at <http://www.gao.gov/special.pubs/ai00033.pdf>, accessed on May 16, 2006.
- [59] Van Den Acker, C., *Belief-function Theory and its Application to the Modeling of Uncertainty in Financial Statement Auditing*, Katholike Universiteit Leuven, 1996.
- [60] G. Zwingelstein, “Évaluation de la criticité des équipements. Méthodes analytiques,” *Sécurité et gestion des risques, Techniques de l'ingénieur*, Ref : TI112 , Jul. 2014.
- [61] C.A. Ericson and C. Li, “Fault tree analysis,” *System Safety Conference*, Orlando, Florida, vol. 1, pp. 1–9, 1999. <https://doi.org/10.1016/j.cosrev.2015.03.001>.
- [62] S.M. Sulaman, A. Beer, M. Felderer, and M. Höst, “Comparison of the FMEA and STPA safety analysis methods—a case study,” *Software Quality Journal*, vol. 27, no. 1, pp. 349–387, 2019. <https://doi.org/10.1007/s11219-017-9396-0>.
- [63] IEC 61025 standard. “Fault tree analysis (FTA)”, International Electrotechnical Commission, Ed. 2, 103 pages, Geneva, Switzerland, 2006.

- [64] W.E. Vesely, F.F. Goldberg, N.H. Roberts and D.F. Haasl, Fault tree handbook, Nuclear Regulatory Commission Washington DC, Vol.13, no.10, Réf: 13671554, 211 pages , USA, Jan.1981.
- [65] Y. Mortureux, “Arbres de défaillance, des causes et d’événement,” Sécurité et gestion des risques, Ed. Techniques Ingénieur, Ref: SE4050 v1, 2002.
- [66] Kaya, İ., Çolak, M., & Terzi, F. (2018). Use of MCDM techniques for energy policy and decision-making problems: A review. *International Journal of Energy Research*, 42(7), pp. 2344-2372. <https://doi.org/10.1002/er.4016>.
- [67] Kumar, A., Sah, B., Singh, A. R., Deng, Y., He, X., Kumar, P., & Bansal, R. C. (2017). A review of multi criteria decision making (MCDM) towards sustainable renewable energy development. *Renewable and sustainable energy reviews*, 69, pp. 596-609. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.191>.
- [68] Zavadskas, E. K., Turskis, Z., & Kildienė, S. (2014). State of art surveys of overviews on MCDM/MADM methods. *Technological and economic development of economy*, 20(1), pp. 165-179. <https://doi.org/10.3846/20294913.2014.892037>.
- [69] Lee, H. C., & Chang, C. T. (2018). Comparative analysis of MCDM methods for ranking renewable energy sources in Taiwan. *Renewable and sustainable energy reviews*, 92, pp. 883-896. [10.1016/j.rser.2018.05.007](https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.05.007).
- [70] Gal, T., Stewart, T., & Hanne, T. (Eds.). (2013). *Multicriteria decision making: advances in MCDM models, algorithms, theory, and applications (Vol. 21)*. Springer Science & Business Media.
- [71] Hájek, P. (2013). *Metamathematics of fuzzy logic (Vol. 4)*. Springer Science & Business Media.
- [72] Saaty, T. L. (1980). The analytic hierarchy process (AHP). *The Journal of the Operational Research Society*, 41(11), pp. 1073-1076.
- [73] Triantaphyllou, E. (2000). *Multi-criteria decision making methods: A comparative study*. Springer Science+Business Media Dordrecht, 44, pp. 306. <http://doi.org/10.1007/978-1-4757-3157-6>.
- [74] Pohekar, S.D., Ramachandran, M. (2004). Application of multi-criteria decision making to sustainable energy planning - A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 8(4), pp. 365-381. <http://doi.org/10.1016/j.rser.2003.12.007>.
- [75] Qin, G., Li, R., Yang, M., Wang, B., Ni, P., & Wang, Y. (2024). Failure probability estimation of natural gas pipelines due to hydrogen embrittlement using an improved fuzzy fault tree approach. *Journal of Cleaner Production*, 448, pp. 141601. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141601>
- [76] Yazdi, M. (2017). Hybrid probabilistic risk assessment using fuzzy FTA and fuzzy AHP in a process industry. *J Fail Anal Prev* 17, pp. 756–764. <https://doi.org/10.1007/s11668-017-0305-4>.
- [77] Song, Y. (2014). *Intelligent PID controller based on fuzzy logic control and neural network technology for indoor environment quality improvement (Doctoral dissertation, University of Nottingham)*.
- [78] Liu, J. (2018). *Intelligent control design and Matlab simulation (pp. 113-233)*. Singapore: Springer.
- [79] Dzitac, I., Filip, F. G., & Manolescu, M. J. (2017). Fuzzy logic is not fuzzy: World-renowned computer scientist Lotfi A. Zadeh. *International Journal of Computers Communications & Control*, 12(6), pp. 748-789.
- [80] Nguyen, H. T., Walker, C., & Walker, E. A. (2018). *A first course in fuzzy logic*. Chapman and Hall/CRC.
- [81] Zadeh, L. A. (2015). Fuzzy logic—a personal perspective. *Fuzzy sets and systems*, 281, pp. 4-20. <https://doi.org/10.1016/j.fss.2015.05.009>.
-

- [82] Singh, H., Gupta, M. M., Meitzler, T., Hou, Z. G., Garg, K. K., Solo, A. M., & Zadeh, L. A. (2013). Real-life applications of fuzzy logic. *Advances in Fuzzy Systems*, 2013, pp. 3. <http://dx.doi.org/10.1155/2013/581879>
- [83] Hong, J., Tamakloe, R., & Park, D. (2020). Application of association rules mining algorithm for hazardous materials transportation crashes on expressway. *Accident Analysis & Prevention*, 142, pp. 105497. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2020.105497>.
- [84] Roohian, H., Abbasi, A., Hosseini, Z., & Jahanmiri, A. (2014). Comparative modeling and analysis of the mass transfer coefficient in a turbulent bed contactor using artificial neural network and adaptive neuro-fuzzy inference systems. *Separation Science and Technology*, 49(10), pp. 1574-1583. <https://doi.org/10.1080/01496395.2014.891238>.
- [85] Mandal, S., Mahapatra, S. S., & Patel, R. K. (2015). Neuro fuzzy approach for arsenic (III) and chromium (VI) removal from water. *Journal of Water Process Engineering*, 5, pp. 58-75. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2015.01.002>.
- [86] Pamučar, D., Ljubojević, S., Kostadinović, D., & Đorović, B. (2016). Cost and risk aggregation in multi-objective route planning for hazardous materials transportation—A neuro-fuzzy and artificial bee colony approach. *Expert Systems with Applications*, 65, pp. 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2016.08.024>.
- [87] Shabani, M. O., & Mazahery, A. (2013). Optimization of Al Matrix Reinforced with B 4 C Particles. *JOM*, 65(2), pp. 272-277. <https://doi.org/10.1007/s11837-012-0502-2>.
- [88] Mazahery, A., & Shabani, M. O. (2012). Process conditions optimization in Al–Cu alloy matrix composites. *Powder Technology*, 225, pp. 101-106. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2012.03.039>.
- [89] Liang, J. J., Qin, A. K., Suganthan, P. N., & Baskar, S. (2006). Comprehensive learning particle swarm optimizer for global optimization of multimodal functions. *IEEE transactions on evolutionary computation*, 10(3), pp. 281-295. [10.1109/TEVC.2005.857610](https://doi.org/10.1109/TEVC.2005.857610).
- [90] Shabani, M. O., & Mazahery, A. (2012). Artificial intelligence in numerical modeling of nano sized ceramic particulates reinforced metal matrix composites. *Applied Mathematical Modelling*, 36(11), pp. 5455-5465. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2011.12.059>.
- [91] Shabani, M. O., & Mazahery, A. (2012). Application of FEM and ANN in characterization of Al matrix nano composites using various training algorithms. *Metall Mater Trans A*, 43, pp. 2158-2165. <https://doi.org/10.1007/s11661-011-1040-1>.
- [92] Tripathi, P. K., Bandyopadhyay, S., & Pal, S. K. (2007). Multi-objective particle swarm optimization with time variant inertia and acceleration coefficients. *Information sciences*, 177(22), pp. 5033-5049. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2007.06.018>.
- [93] Mazahery, A., Shabani, M. O., Alizadeh, M., & Tofigh, A. A. (2013). Concurrent fitness evaluations in searching for the optimal process conditions of Al matrix nanocomposites by linearly decreasing weight. *Journal of composite materials*, 47(14), pp. 1765-1772. <https://doi.org/10.1177/0021998312451298>.
- [94] Kennedy, J., & Eberhart, R. (1995, November). Particle swarm optimization. In *Proceedings of ICNN'95-international conference on neural networks* (Vol. 4, pp. 1942-1948). IEEE. [10.1109/ICNN.1995.488968](https://doi.org/10.1109/ICNN.1995.488968).
- [95] Beasley, D., Bull, D. R., & Martin, R. R. (1993). A sequential niche technique for multimodal function optimization. *Evolutionary computation*, 1(2), pp. 101-125. <https://doi.org/10.1162/evco.1993.1.2.101>.
- [96] Brits, R., Engelbrecht, A. P., & van den Bergh, F. (2007). Locating multiple optima using particle swarm optimization. *Applied Mathematics and Computation*, 189(2), pp. 1859-1883. <https://doi.org/10.1016/j.amc.2006.12.066>.
- [97] Yang X-S (2009) Firefly algorithms for multimodal optimization. In: Watanabe O, Zeugmann T (eds) *Stochastic algorithms: foundations and applications*. SAGA 2009. Lecture Notes in Computer Science, vol 5792. Springer, Berlin, Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-04944-6\\_14](https://doi.org/10.1007/978-3-642-04944-6_14).
-

- [98] Li F, Fan X, Hou ZA (2020) firefly algorithm with self-adaptive population size for global path planning of mobile robot. *IEEE Access* 8, pp. 168951-168964. [10.1109/ACCESS.2020.3023999](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3023999).
- [99] ATASHPAZ-GARGARI, Esmail et LUCAS, Caro. Imperialist competitive algorithm: an algorithm for optimization inspired by imperialistic competition. In : 2007 IEEE congress on evolutionary computation. Ieee, 2007. pp. 4661-4667. [10.1109/CEC.2007.4425083](https://doi.org/10.1109/CEC.2007.4425083).
- [100] Goldberg DE (1989) Genetic algorithms in search, optimization and machine learning. Addison-Wesley, Reading.
- [101] AHMADI. Seyed-Alireza. Human behavior-based optimization: A novel metaheuristic approach to solve complex optimization problems. *Neural Comput. Appl.* 2017, 28, pp. 233–244. <https://doi.org/10.1007/s00521-016-2334-4>.
- [102] Griffiths, D.J. Introduction to Electrodynamics, Cambridge University Press; 4th edition, July 12, 2017, ISBN : .pages 620 ,1108420419-978 .
- [103] Van Ulden, A. P. (1978). Simple estimates for vertical diffusion from sources near the ground. *Atmospheric Environment* (1967), 12(11), pp. 2125-2129. [https://doi.org/10.1016/0004-6981\(78\)90167-1](https://doi.org/10.1016/0004-6981(78)90167-1)
- [104] Hong, J., Tamakloe, R., & Park, D. (2020). Application of association rules mining algorithm for hazardous materials transportation crashes on expressway. *Accident Analysis & Prevention*, 142, pp. 105497. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2020.105497>.
- [105] Zhou, Z., Ha, M., Hu, H., & Ma, H. (2021). Half open multi-depot heterogeneous vehicle routing problem for hazardous materials transportation. *Sustainability*, 13(3), pp. 1262. <https://doi.org/10.3390/su13031262>.
- [106] Boubedra, S., Tolba, C., Manzoni, P., Beddiar, D., & Zennir, Y. (2023). Urban traffic flow management on large scale using an improved ACO for a road transportation system. *International Journal of Intelligent Computing and Cybernetics*, 16(4), pp. 766-799. <https://doi.org/10.1108/IJICC-02-2023-0020>.
- [107] Achouri, M., Zennir, Y., Tolba, C., Innal, F., Bensaci, C., & Liu, Y. (2024). Adaptive-neuro fuzzy inference trained with PSO for estimating the concentration and severity of sulfur dioxiderelease. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, pp. 1-14. <https://doi.org/10.1007/s13198-024-02336-5>.
- [108] Mourad, A., Youcef, Z., & Tolba, C. (2022). Cost and risk prediction in road transportation of Hazmat by ANFIS trained with PSO, FA, HBBO and ICA. *Journal homepage: http://iieta.org/journals/ijssse*, 12(4), pp. 429-439. <https://doi.org/10.18280/ijssse.120403>
- [109] Budiyanto, M. A., & Fernanda, H. (2020). Risk assessment of work accident in container terminals using the fault tree analysis method. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(6), pp. 466. <https://doi.org/10.3390/jmse8060466>.
- [110] Li, Y., Xu, D., & Shuai, J. (2020). Real-time risk analysis of road tanker containing flammable liquid based on fuzzy Bayesian network. *Process Safety and Environmental Protection*, 134, pp. 36-46. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2019.11.033>.
- [111] Luan, T., Zhang, X., Chang, J., Wang, Y., & Li, H. (2023). Dynamic risk analysis of flammable liquid road tanker based on fuzzy Bayesian network. *Process Safety Progress*, 42(4), pp. 737-751. <https://doi.org/10.1002/prs.12508>.
- [112] Huang, W., Zhang, Y., Kou, X., Yin, D., Mi, R., & Li, L. (2020). Railway dangerous goods transportation system risk analysis: An Interpretive Structural Modeling and Bayesian Network combining approach. *Reliability Engineering & System Safety*, 204, pp. 107220. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2020.107220>.
- [113] Zarei, E., Gholamizadeh, K., Khan, F., & Khakzad, N. (2022). A dynamic domino effect risk analysis model for rail transport of hazardous material. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 74, pp. 104666. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2021.104666>.

- [114] Caliendo, C., & Genovese, G. (2021). Quantitative risk assessment on the transport of dangerous goods vehicles through unidirectional road tunnels: an evaluation of the risk of transporting hydrogen. *Risk analysis*, 41(9), pp. 1522-1539. <https://doi.org/10.1111/risa.13653>.
- [115] Brodny, J., & Tutak, M. (2023). Assessing the energy security of European Union countries from two perspectives—A new integrated approach based on MCDM methods. *Applied Energy*, 347, pp. 121443. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121443>.
- [116] Duan, Y., Sun, Y., Zhang, Y., Fan, X., Dong, Q., & Guo, S. (2021). Risk evaluation of electric power grid investment in China employing a hybrid novel MCDM method. *Mathematics*, 9(5), pp. 473. <https://doi.org/10.3390/math9050473>.
- [117] Lyu, H. M., & Yin, Z. Y. (2023). An improved MCDM combined with GIS for risk assessment of multi-hazards in Hong Kong. *Sustainable Cities and Society*, 91, pp. 104427. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104427>.
- [118] Ghaleb, A. M., Kaid, H., Alsamhan, A., Mian, S. H., & Hidri, L. (2020). Assessment and comparison of various MCDM approaches in the selection of manufacturing process. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2020(1), pp. 4039253. <https://doi.org/10.1155/2020/4039253>.
- [119] Guo, J., Luo, C., & Ma, K. (2023). Risk coupling analysis of road transportation accidents of hazardous materials in complicated maritime environment. *Reliability Engineering & System Safety*, 229, pp. 108891. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2022.108891>.
- [120] Yilmaz, Z., Verter, V. (2022). A Multi-Criteria Decision-Making Approach for Hazmat Transportation. In: Topcu, Y.I., Önsel Ekici, Ş., Kabak, Ö., Aktas, E., Özaydın, Ö. (eds) *New Perspectives in Operations Research and Management Science*. International Series in Operations Research & Management Science, vol 326. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-91851-4\\_14](https://doi.org/10.1007/978-3-030-91851-4_14).
- [121] Derse, O., Oturakci, M., & Dagsuyu, C. (2022). Risk analysis application to hazardous material transportation modes. *Transportation research record*, 2676(3), pp. 586-597. <https://doi.org/10.1177/03611981211052961>.
- [122] Gupta, P., Mehlatat, M. K., Aggarwal, U., & Charles, V. J. R. P. (2021). An integrated AHP-DEA multi-objective optimization model for sustainable transportation in mining industry. *Resources Policy*, 74, pp. 101180. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2018.04.007>.
- [123] Panchal, S., & Shrivastava, A. K. (2022). Landslide hazard assessment using analytic hierarchy process (AHP): A case study of National Highway 5 in India. *Ain Shams Engineering Journal*, 13(3), pp. 101626. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2021.10.021>.
- [124] Achouri, M., & Zennr, Y. (2022, December). Fuzzy Adaptive Sliding Mode Controller: applied to inverted pendulum. In *2022 IEEE 21st international Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (STA)*, pp. 28-33. IEEE. [10.1109/STA56120.2022.10019130](https://doi.org/10.1109/STA56120.2022.10019130).
- [125] Leonardi, G., Palamara, R., & Suraci, F. (2020). A fuzzy methodology to evaluate the landslide risk in road lifelines. *Transportation research procedia*, 45, pp. 732-739. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.02.104>.
- [126] Huang, P., Hu, G., Yong, Z., Mao, B., & Bai, Z. (2022). Fire risk assessment of battery transportation and storage by combining fault tree analysis and fuzzy logic. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 77, pp. 104774. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2022.104774>.
- [127] Ayyildiz, E., & Taskin Gumus, A. (2021). Pythagorean fuzzy AHP based risk assessment methodology for hazardous material transportation: an application in Istanbul. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(27), pp. 35798-35810. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-13223-y>.
- [128] Koohathongsumrit, N., & Meethom, W. (2021). An integrated approach of fuzzy risk assessment model and data envelopment analysis for route selection in multimodal transportation networks. *Expert Systems with Applications*, 171, pp. 114342. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2020.114342>.
-

- [129] Yazdi, M., Korhan, O., & Daneshvar, S. (2018). Application of fuzzy fault tree analysis based on modified fuzzy AHP and fuzzy TOPSIS for fire and explosion in the process industry. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, 26(2), 319–335. <https://doi.org/10.1080/10803548.2018.1454636>.
- [130] Lin, C. T., & Wang, M. J. J. (1997). Hybrid fault tree analysis using fuzzy sets. *Reliability Engineering & System Safety*, 58(3), pp. 205-213. [https://doi.org/10.1016/S0951-8320\(97\)00072-0](https://doi.org/10.1016/S0951-8320(97)00072-0).
- [131] Hsu, H. M., & Chen, C. T. (1996). Aggregation of fuzzy opinions under group decision making. *Fuzzy sets and systems*, 79(3), pp. 279-285. [https://doi.org/10.1016/0165-0114\(95\)00185-9](https://doi.org/10.1016/0165-0114(95)00185-9).
- [132] Yazdi, M. (2017). Hybrid probabilistic risk assessment using fuzzy FTA and fuzzy AHP in a process industry. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 17, pp. 756-764. <https://doi.org/10.1007/s11668-017-0305-4>.
- [133] Yazdi, M. (2019). Retracted article: an extension of the fuzzy improved risk graph and fuzzy analytical hierarchy process for determination of chemical complex safety integrity levels. *International journal of occupational safety and ergonomics*, 25(4), pp. 551-561. <https://doi.org/10.1080/10803548.2017.1419654>.
- [134] Onisawa, T. (1988). An approach to human reliability in man-machine systems using error possibility. *Fuzzy sets and Systems*, 27(2), pp. 87-103. [https://doi.org/10.1016/0165-0114\(88\)90140-6](https://doi.org/10.1016/0165-0114(88)90140-6)
- [135] Planas, E., Arnaldos, J., Silvetti, B., Vallee, A., & Casal, J. (2006). A risk severity index for industrial plants and sites. *Journal of hazardous materials*, 130(3), pp. 242-250. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2005.07.015>.
- [136] Martínez-Alegría, R., Ordóñez, C., & Taboada, J. (2003). A conceptual model for analyzing the risks involved in the transportation of hazardous goods: implementation in a geographic information system. *Human and Ecological Risk Assessment*, 9(3), pp. 857-873. <https://doi.org/10.1080/713609970>.
- [137] Cordeiro, F. G., Bezerra, B. S., Peixoto, A. S. P., & Ramos, R. A. R. (2016). Methodological aspects for modeling the environmental risk of transporting hazardous materials by road. *Transportation research part D: transport and environment*, 44, pp. 105-121. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2016.02.008>.
- [138] Koks, E. E., Rozenberg, J., Zorn, C., Tariverdi, M., Vousdoukas, M., Fraser, S. A., ... & Hallegatte, S. (2019). A global multi-hazard risk analysis of road and railway infrastructure assets. *Nature communications*, 10(1), pp. 2677. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-10442-3>.
- [139] Song, X., Wu, J., Zhang, H., & Pi, R. (2020). Analysis of crash severity for hazard material transportation using highway safety information system data. *SAGE Open*, 10(3), pp. 2158244020939924. <https://doi.org/10.1177/2158244020939924>.
- [140] Guo, J., & Luo, C. (2022). Risk assessment of hazardous materials transportation: A review of research progress in the last thirty years. *Journal of traffic and transportation engineering (English edition)*. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2022.01.004>.
- [141] Luo, D., Liao, C. J., & Yu, X. R. (2019). 2013-2017 statistics and preventive measures of hazardous chemicals transportation accidents in China. *China Public Secur. (Acad. Ed.)*, 54(1), pp. 34-38.
- [142] Ilbahar, E., Kardeş, A., Cebi, S., & Kahraman, C. (2018). A novel approach to risk assessment for occupational health and safety using Pythagorean fuzzy AHP & fuzzy inference system. *Safety science*, 103, pp. 124-136. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2017.10.025>.
- [143] Tasnim, N., Tahmid, M., Jahan, N., & Syeda, S. R. (2023). Risk Assessment Framework for Selecting the Safer Route for Hazmat Transportation Based on Accident Database and Vulnerability Models. *ACS Chemical Health & Safety*, 30(5), pp. 302-317. <https://doi.org/10.1021/acs.chas.3c00044>.
-

- [144] Yu, S., Li, Y., Xuan, Z., Li, Y., & Li, G. (2022). Real-time risk assessment for road transportation of hazardous materials based on GRU-DNN with multimodal feature embedding. *Applied Sciences*, 12(21), pp. 11130. <https://doi.org/10.3390/app12211130>.
- [145] Weng, J., Gan, X., & Zhang, Z. (2021). A quantitative risk assessment model for evaluating hazmat transportation accident risk. *Safety science*, 137, pp. 105198. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2021.105198>.
- [146] Guo, J., & Ma, K. (2024). Risk analysis for hazardous chemical vehicle-bridge transportation system: A dynamic Bayesian network model incorporating vehicle dynamics. *Reliability Engineering & System Safety*, 242, pp. 109732. <https://doi.org/10.1016/j.res.2023.109732>.
- [147] Guo, J., Luo, C., & Ma, K. (2023). Risk coupling analysis of road transportation accidents of hazardous materials in complicated maritime environment. *Reliability Engineering & System Safety*, 229, pp. 108891. <https://doi.org/10.1016/j.res.2022.108891>.
- [148] Wu, J., Lu, Y., Shi, S., Zhou, R., & Liu, Y. (2023). Research on the prediction model of hazardous chemical road transportation accidents. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, pp. 105103. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2023.105103>.
- [149] Wang, B., Zhu, Y., Li, D., & Wu, C. (2022). Evidence-based accident prevention and its application to hazardous chemical storage accident prevention. *Process Safety and Environmental Protection*, 160, pp. 274-285. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.02.020>.
- [150] Ghaleh, S., Omidvari, M., Nassiri, P., Momeni, M., & Lavasani, S. M. M. (2019). Pattern of safety risk assessment in road fleet transportation of hazardous materials (oil materials). *Safety science*, 116, pp. 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2019.02.039>.
- [151] Shah, S. A. R., Ahmad, N., Shen, Y., Pirdavani, A., Basheer, M. A., & Brijs, T. (2018). Road safety risk assessment: an analysis of transport policy and management for low-, middle-, and high-income Asian countries. *Sustainability*, 10(2), pp. 389. <https://doi.org/10.3390/su10020389>.
- [152] Sarkar, S., Pramanik, A., & Maiti, J. (2023). An integrated approach using rough set theory, ANFIS, and Z-number in occupational risk prediction. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 117, pp. 105515. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2022.105515>.
- [153] Iranitalab, A., & Khattak, A. (2017). Comparison of four statistical and machine learning methods for crash severity prediction. *Accident Analysis & Prevention*, 108, pp. 27-36. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2017.08.008>.
- [154] Shen, X., & Wei, S. (2021). Severity analysis of road transport accidents of hazardous materials with machine learning. *Traffic injury prevention*, 22(4), pp. 324-329. <https://doi.org/10.1080/15389588.2021.1900569>.
- [155] Ebrahimi, H., Sattari, F., Lefsrud, L., & Macciotta, R. (2023). A machine learning and data analytics approach for predicting evacuation and identifying contributing factors during hazardous materials incidents on railways. *Safety science*, 164, pp. 106180. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2023.106180>.
- [156] Sun, M., Zhou, R., Jiao, C., & Sun, X. (2022). Severity analysis of hazardous material road transportation crashes with a Bayesian network using Highway Safety Information System data. *International journal of environmental research and public health*, 19(7), pp. 4002. <https://doi.org/10.3390/ijerph19074002>.
- [157] Fragiadakis, N. G., Tsoukalas, V. D., & Papazoglou, V. J. (2014). An adaptive neuro-fuzzy inference system (anfis) model for assessing occupational risk in the shipbuilding industry. *Safety Science*, 63, pp. 226-235. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2013.11.013>.
- [158] Bilgili, M., Ilhan, A., & Ünal, Ş. (2022). Time-series prediction of hourly atmospheric pressure using ANFIS and LSTM approaches. *Neural Computing and Applications*, 34(18), pp. 15633-15648. <https://doi.org/10.1007/s00521-022-07275-5>.
- [159] Onu, C. E., Nweke, C. N., & Nwabanne, J. T. (2022). Modeling of thermo-chemical pretreatment of yam peel substrate for biogas energy production: RSM, ANN, and ANFIS

- comparative approach. *Applied Surface Science Advances*, 11, pp. 100299. <https://doi.org/10.1016/j.apsadv.2022.100299>.
- [160] Paryani, S., Neshat, A., & Pradhan, B. (2021). Spatial landslide susceptibility mapping using integrating an adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) with two multi-criteria decision-making approaches. *Theoretical and Applied Climatology*, 146(1-2), pp. 489-509. <https://doi.org/10.1007/s00704-021-03695-w>.
- [161] Tightiz, L., Nasab, M. A., Yang, H., & Addeh, A. (2020). An intelligent system based on optimized ANFIS and association rules for power transformer fault diagnosis. *ISA transactions*, 103, pp. 63-74. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2020.03.022>.
- [162] Alikhani, M., Nedaie, A., & Ahmadvand, A. (2013). Presentation of clustering-classification heuristic method for improvement accuracy in classification of severity of road accidents in Iran. *Safety science*, 60, pp. 142-150. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2013.06.008>.
- [163] Bakirtzis, A. G., Theocharis, J. B., Kiartzis, S. J., & Satsios, K. J. (1995). Short term load forecasting using fuzzy neural networks. *IEEE Transactions on Power Systems*, 10(3), pp. 1518-1524. [10.1109/59.466494](https://doi.org/10.1109/59.466494).
- [164] Huang, W., Liu, H., Zhang, Y., Mi, R., Tong, C., Xiao, W., & Shuai, B. (2021). Railway dangerous goods transportation system risk identification: Comparisons among SVM, PSO-SVM, GA-SVM and GS-SVM. *Applied Soft Computing*, 109, pp. 107541. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2021.107541>.
- [165] Achouri, Mourad., Zennir, Y., & Tolba, C. (2022). Cost and risk prediction in road transportation of Hazmat by ANFIS trained with PSO, FA, HBBO and ICA. *Journal homepage: http://iieta.org/journals/ijssse*, 12(4), pp. 429-439. <https://doi.org/10.18280/ijssse.120403>.
- [166] Zhang, L., Deng, N., Wang, Y., Ma, X., Lin, M., & Zhang, P. (2023). Mitigating sustainability risks in a road hazardous materials transport network. *Transportation research record*, 2677(5), pp. 149-165. <https://doi.org/10.1177/03611981221128802>.
- [167] Wang, B., Qian, Q., Tan, Z., Zhang, P., Wu, A., & Zhou, Y. (2020). Multidepot heterogeneous vehicle routing problem for a variety of hazardous materials with risk analysis. *Scientific Programming*, 2020, pp. 1-11. <https://doi.org/10.1155/2020/8839628>.
- [168] Malta, S., Rizza, U., & Tirabassi, T. (1997). SPM: An operative model for the dispersion of skewed puffs. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 21, pp 9. [10.2495/AIR970271](https://doi.org/10.2495/AIR970271).
- [169] Gheorghe, A., Gheorghe, A. V., & Vamanu, D. (1996). *Emergency planning knowledge* (No. 13). vdf Hochschulverlag AG.
- [170] Gheorghe, A. V., Grote, G., Kogelschatz, D., Fenner, K., Harder, A., & Moresi, E. (2000). *Integrated risk assessment, transportation of dangerous goods: Case study. Zurich, Switzerland: Target: Basel-Zurich/VCL. ETH KOVERS.*
- [171] Gheorghe, A. V., & Birchmeier, J. (2002). *Hot spot based risk assessment for transportation dangerous goods by railway: a new proposal for transportation risk assessment. ETH Zurich.*
- [172] Vamanu, B. I., Gheorghe, A. V., & Katina, P. F. (2016). *Critical Infrastructures: Risk and vulnerability assessment in transportation of dangerous goods. Cham: Springer International Publishing.* <https://doi.org/10.1007/978-3-319-30931-6>.
- [173] Mandal, S., Sahu, M. K., Giri, A. K., & Patel, R. K. (2014). Adsorption studies of chromium (VI) removal from water by lanthanum diethanolamine hybrid material. *Environmental technology*, 35(7), pp. 817-832. <https://doi.org/10.1080/09593330.2013.852627>.
- [174] Barad, M. L. (1958). *Project Prairie Grass, a Field Program in Diffusion. Volume 1. Air Force Cambridge Research Labs Hanscom Afb MA.*
- [175] Chang, J. C., & Hanna, S. R. (2004). Air quality model performance evaluation. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 87(1), pp. 167-196. <https://doi.org/10.1007/s00703-003-0070-7>.
- [176] Mohammadfam, I., Kalatpour, O., & Gholamizadeh, K. (2020). Quantitative assessment of safety and health risks in HAZMAT road transport using a hybrid approach: A case study in

- Tehran. ACS Chemical Health & Safety, 27(4), pp. 240-250. <https://doi.org/10.1021/acs.chas.0c00018>.
- [177] Camastra, F., Ciaramella, A., Giovannelli, V., Lener, M., Rastelli, V., Staiano, A., ... & Starace, A. (2015). A fuzzy decision system for genetically modified plant environmental risk assessment using Mamdani inference. *Expert Systems with Applications*, 42(3), pp. 1710-1716. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2014.09.041>.
- [178] Jamshidi, A., Yazdani-Chamzini, A., Yakhchali, S. H., & Khaleghi, S. (2013). Developing a new fuzzy inference system for pipeline risk assessment. *Journal of loss prevention in the process industries*, 26(1), pp. 197-208. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2012.10.010>.
- [179] Bronfman, A., Marianov, V., Paredes-Belmar, G., & L er-Villagra, A. (2015). The max- imin HAZMAT routing problem. *European Journal of Operational Research*, 241 (1), pp. 15–27. <http://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.08.005>.
- [180] Star  cevi  c, S., & Goši  c, A. (2014). Methodology for choosing a route for transport of dangerous goods: Case study. *Vojnotehni  cki Glasnik/Military Technical Courier*, 62 (3), pp. 165–184. <http://doi.org/10.5937/vojtehg62-497>.
- [181] Bui, D.T., Pradhan, B., Lofman, O., Revhaug, I., Dick, O.B. (2012). Spatial prediction of landslide hazards in Hoa Binh province (Vietnam): A comparative assessment of the efficacy of evidential belief functions and fuzzy logic models. *Catena*, 96, pp. 28-40. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2012.04.001>.
- [182] Shirzadi, A., Bui, D.T., Pham, B.T., Solaimani, K., Chapi, K., Kavian, A., Revhaug, I. (2017). Shallow landslide susceptibility assessment using a novel hybrid intelligence approach. *Environmental Earth Sciences*, 76(2), pp. 1-18. <https://doi.org/10.1007/s12665-016-6374-y>.
- [183] Bui, D.T., Panahi, M., Shahabi, H., Singh, V.P., Shirzadi, A., Chapi, K., Ahmad, B.B. (2018). Novel hybrid evolutionary algorithms for spatial prediction of floods. *Scientific Reports*, 8(1), pp. 1-14. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-33755-7>.