



Université d'Oran 2
Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle

THÈSE

Pour l'obtention du diplôme de doctorat « Science » en
Hygiène et Sécurité Industrielle

**Maitrise de l'emballlement thermique par l'analyse de la
fiabilité des systèmes de refroidissement**

Présentée et soutenue publiquement par :

Mme Benomar Fatima

Le 6 juillet 2026

Devant le jury composé de :

Mekki Ibrahim El khalil	Professeur	Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed	Président
Lounis Zoubida	Professeur	Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed	Directrice de thèse
Aissani Nassima	Professeur	Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed	Co-directrice de thèse
Houat Samir	Professeur	Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem	Examinateur
Boukhris Lahouari	MCA	Université Mohamed Boudiaf USTO	Examinateur
Djebbar Amel Mounia	MCA	École supérieure d'économie d'Oran	Examinatrice

2025-2026

Résumé

L'emballlement thermique constitue un risque majeur redouté dans l'industrie chimique et pétrochimique ; il survient lorsque la chaleur générée par la réaction chimique dépasse la capacité de dissipation du système de refroidissement. Ce type d'accident survient de manière récurrente et peut entraîner des conséquences graves, notamment des pertes humaines, des blessures sévères et des atteintes sanitaires, telles que des malformations affectant les générations présentes et futures. Par ailleurs, l'emballlement thermique entraîne des dommages matériels et environnementaux considérables.

Environ 75 % des phénomènes d'emballlement thermique sont attribués à des défaillances du système de refroidissement. C'est dans ce contexte que le premier objectif de cette thèse est d'analyser le système de refroidissement d'un réacteur adiabatique catalytique à lits fixes appartenant à la compagnie CP1Z du groupe SONATRACH, afin d'en améliorer la fiabilité. Cette analyse s'appuie sur l'utilisation des arbres des défaillances cohérents et non-cohérents, le système étudié étant une boucle de régulation.

Les boucles de régulation étant des systèmes non cohérents, le second objectif de cette thèse est de proposer une approche méthodologique intermédiaire reliant les arbres des défaillances cohérents et non cohérents. Cette approche, appelée arbre de défaillances semi-cohérent, permet d'identifier les composants au comportement non cohérent et d'adapter leur état lors de la construction de l'arbre non cohérent, afin d'améliorer la représentation du comportement réel du système et l'efficacité de l'analyse.

L'application de cette approche a permis de réduire significativement le nombre d'événements de base dans un arbre non-cohérent, celui-ci passant de 50 à 21 événements, soit une réduction de 58 %.

Mots-clés : Emballlement thermique, système de refroidissement, Arbre des défaillances non-cohérent, fiabilité, boucle de régulation.

ملخص

يُعدّ الانفلات الحراري من المخاطر الكبرى التي تُثير القلق في الصناعة الكيميائية والبتروكيميائية، إذ يحدث عندما تتجاوز الحرارة المتولدة عن التفاعل الكيميائي قدرة نظام التبريد على تبديدها. ويقع هذا النوع من الحوادث بشكل متكرر، وقد يؤدي إلى عواقب خطيرة تشمل خسائر في الأرواح، وإصابات جسيمة، وتأثيرات صحية سلبية مثل التشوهات التي قد تُعزى حوالى تمسّ لأجيال الحالية والمستقبلية. إضافةً إلى ذلك، يتسبب الانفلات الحراري في أضرار مادية وبيئية كبيرة

75% من حالات الانفلات الحراري إلى أعطال في نظام التبريد. وفي هذا السياق، يتمثل الهدف الأول من هذه الأطروحة في تحليل نظام تبريد مفاعل حفزي أديباتي ذي سرير ثابت تابع لشركة تصنيع الميثانول لمجمع سوناطراك، بهدف تحسين موثوقيته. يعتمد هذا التحليل على استخدام أشجار الأعطال المتماسكة وغير المتماسكة، باعتبار أن النظام المدروس يمثل حلقة تنظيم وبما أن حلقات التنظيم تُعد أنظمة غير متماسكة بطبيعتها، فإن الهدف الثاني من هذه الأطروحة يتمثل في اقتراح مقارنة منهجية وسيطة تربط بين أشجار الأعطال المتماسكة وغير المتماسكة. وتُسمى هذه المقارنة شجرة الأعطال شبه المتماسكة، حيث تسمح بتحديد المكونات ذات السلوك غير المتماسك وتكييف حالاتها أثناء بناء شجرة الأعطال غير المتماسكة، مما يُحسن تمثيل السلوك الحقيقي للنظام ويزيد من فعالية التحليل. أدى تطبيق هذا النهج إلى انخفاض كبير في عدد الأحداث الأساسية في شجرة الأعطال غير المتماسكة، حيث انخفض عددها من 50 إلى 21 حدثاً، أي بانخفاض قدره 58%.

الكلمات المفتاحية: الانفلات الحراري، نظام التبريد، شجرة الأعطال غير المتماسكة، الاعتمادية، حلقة التنظيم

Abstract

Thermal runaway constitutes a major risk feared in the chemical and petrochemical industries. It occurs when the heat generated by a chemical reaction exceeds the cooling system's heat-removal capacity. This type of accident occurs recurrently and may lead to severe consequences, including loss of human life, serious injuries, and adverse health effects such as malformations affecting present and future generations. In addition, thermal runaway causes significant material and environmental damage.

Approximately 75% of thermal runaway phenomena are attributed to cooling system failures. In this context, the first objective of this thesis is to analyse the cooling system of an adiabatic fixed-bed catalytic reactor belonging to the CP1Z Company of the SONATRACH group, with the aim of improving its reliability. This study employs coherent and non-coherent fault tree analysis, as the system under study is a control loop.

Since control loops are inherently non-coherent systems, the second objective of this thesis is to propose an intermediate methodological approach bridging coherent and non-coherent fault trees. This approach, referred to as the semi-coherent fault tree, makes it possible to identify components exhibiting non-coherent behaviour and to adapt their states during the construction of the non-coherent fault tree, thereby improving the representation of the system's actual behaviour and enhancing the efficiency of the analysis.

Applying this approach significantly reduced the number of basic events in a non-coherent fault tree, from 50 to 21 events, a reduction of 58 %.

Key words: thermal runaway, cooling system, non-coherent fault tree, reliability, regulation loop

Remerciements

Louange à Allah qui m'a donné la force, la patience et la persévérance nécessaires pour mener à bien ce travail, et qui m'a accompagné tout au long de ce parcours jusqu'à son aboutissement. *Elhamdulillah*.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mes deux directrices de thèse.

Madame Lounis Zoubida, pour son soutien constant, son encadrement rigoureux, ses conseils précieux et l'attention bienveillante qu'elle m'a accordée tout au long de ces années.

Madame Aissani Nassima, pour sa patience exemplaire, sa grande disponibilité, son accompagnement scientifique, la pertinence et la justesse de ses conseils, ainsi que pour son amitié et la confiance qu'elle m'a témoignée, en particulier dans les moments les plus exigeants de cette recherche, contribuant ainsi de manière déterminante à l'aboutissement de cette thèse.

Je remercie également Monsieur Mekki Ibrahim El Khalil, professeur à l'université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed, pour l'honneur qu'il nous a fait en acceptant de présider le jury de cette thèse.

J'exprime aussi ma profonde reconnaissance à Monsieur Houat Samir, professeur à l'université Abdelhamid Ben Badis de Mostaganem, à Monsieur Boukhris Lahouari, maître de conférences A, à l'université Mohamed Boudiaf USTO, ainsi qu'à Madame Djebbar Amel Mounia, maître de conférences A, à l'école supérieure d'économie d'Oran, pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant d'examiner ce travail et pour l'intérêt et l'attention qu'ils ont bien voulu lui accorder.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance à la compagnie CP1Z du groupe SONATRACH, et plus particulièrement aux responsables et aux ingénieurs qui ont facilité l'accès aux données, apporté leur expertise technique et contribué, par leurs échanges constructifs, à la réalisation de l'étude du cas présenté dans cette thèse.

Je remercie également mes collègues et amis(es), pour leur soutien moral, leurs encouragements, leurs conseils et les échanges enrichissants qui ont accompagné ce parcours doctoral.

Dédicace

Je dédie ce mémoire à la mémoire de ma mère Khèira et ma sœur Rahma

Table des matières

Résumé	ii
Remerciements	iv
Dédicace.....	v
Liste des figures	x
Liste des tableaux	xiii
Nomenclature.....	xiv
Acronymes.....	xv
Introduction générale.....	1
Chapitre I : État de l’art de l’emballage thermique	
I-1- Introduction	7
I-2- L’emballage thermique	8
I-3- La théorie de l’emballage thermique	9
I-3-1- Le bilan thermique	10
1- La production de chaleur	10
2- L’élimination de chaleur.....	11
3- L’accumulation de chaleur	12
I-3-2- Le diagramme de SEMENOV.....	13
I-3-3- Le scénario d’un emballage thermique	14
I-4- Les classes critiques des scénarii d’un emballage thermique	20
I-5- Les conséquences de l’emballage thermique	23
I-6- Les causes de l’emballage thermique.....	26
I-7- Accidentologie	28
1-7-1- Accidentologie dans le monde.....	28
I-7-2- Les principales réactions ayant été impliquées dans des accidents recensés	31
1-7-3- L’accidentologie en Algérie	32
I-8- Réglementation.....	37
I-8-1- La législation européenne.....	38
I-8-2- La législation algérienne	40
I-9- Conclusion.....	45
Chapitre II : Les arbres des défaillances cohérents	
II-1- Introduction.....	48
II-2- L’arbre des défaillances	49
II-3- Le but de la méthode	51
II-4- La mise en œuvre de la méthode	52

II-4-1- L'objectif de l'arbre des défaillances	54
II-4-2- Définition de l'événement principal.....	54
II-4-3- Définition du champ d'application de l'arbre des défaillances	54
II-4-4- Définition de la résolution de l'arbre des défaillances.....	55
II-4-5- Définition des règles de base de l'arbre des défaillances	55
II-4-6- Construction de l'arbre des défaillances	56
II-4-7- L'exploitation de l'arbre des défaillances	57
II-4-8- Interprétation de l'arbre des défaillances	58
II-5- La fonction de structure.....	58
La définition de la cohérence	61
1- La propriété de monotonie	61
2- La propriété de pertinence	63
II-6- L'analyse qualitative	63
II-6-1- Coupes et coupes minimales	64
II-6-1-1- Les coupes.....	64
II-6-1-2- les coupes minimales	65
II-6- 2- les coupes minimales pour un arbre de défaillances cohérent	66
II-6-2-1- Les lois algébriques booléennes.....	66
II-6-2-2- La méthode descendante (Top-down).....	67
II-6-2-3- La méthode ascendante (Bottom-up)	69
II-7- L'analyse quantitative	69
II-7-1- Les paramètres de l'analyse quantitative	70
II-7-1-1- La fiabilité (<i>Reliability</i>).....	70
II-7-1-2- La disponibilité (<i>Availability</i>)	70
II-7-1-3- L'intensité de défaillance	71
II-7-1-4- Le nombre prévu de défaillances	71
II-7-2- Probabilité de défaillance des composants.....	71
II-7-2-1- Le composant est irréparable	72
II-7-2-2- Le composant est réparable (défaillance détectée)	72
II-7-2-3- Défaillance non détectée	73
II-7-3- Calcul de la probabilité de l'événement sommet.....	74
II-7-3-1- La méthode de la fonction de structure.....	74
II-7-3-2- Le théorème de Shannon.....	75
II-7-3-3- La méthode du développement d'inclusion – exclusion.....	78
II-7-3-4- Les méthodes approximatives.....	79

1- L'approximation des événements rares	79
2 - La borne inférieure.....	80
3- La borne supérieure des coupes minimales	80
II-7-3-5- La méthode du diagramme de décision binaire	81
II-7-4- Les facteurs d'importance.....	85
II-7-4-1- Les facteurs d'importance déterministes	86
II-7-4-2- Les facteurs d'importance probabilistes	88
1- Le facteur d'importance de Birnbaum	88
2- Le facteur d'importance critique.....	89
3- Le facteur d'importance de Fussell-Vesely	89
4- Le facteur de diminution du risque	90
5- Le facteur d'augmentation du risque	90
II-8- Conclusion	91
Chapitre III : Les arbres des défaillances non-cohérents	
III-1- Introduction	94
III-2- Les arbres des défaillances non-cohérents.....	95
III-3- Le modèle des arbres des défaillances non-cohérents	97
III-4- Des exemples d'arbres des défaillances non-cohérents.....	99
III-4- 1- Système à multitâches	99
III-5 - Système à deux alimentations électriques	106
III-6- L'analyse qualitative.....	108
III-6-1- les impliquant premiers	109
III-6-2- Le théorème du consensus.....	113
III-7- L'analyse quantitative.....	115
III-7-1- Les facteurs d'importance	116
1- Le facteur d'importance de Birnbaum	117
2- Le facteur d'importance de Fussell-Vesely.....	118
III-8-Conclusion	119
Chapitre IV : Application de la méthode semi-cohérente pour l'analyse du risque majeur d'emballlement thermique	
IV-1-Introduction	122
IV-2- Première partie : Explication de la méthode utilisée	123
IV-2-1- La méthode proposée.....	123
IV-2-3- L'approche semi-cohérente	126
IV-3-Deuxième partie	129
IV-3-1- Application de la méthode semi-cohérente.	129

IV-3-2- Les résultats de l'étude	133
IV-3-2-1- Les résultats de l'arbre des défaillances cohérent	133
IV-3-2-2- Application et résultats de l'arbre des défaillances semi-cohérent	136
IV-3-2-3- Les résultats pour l'arbre des défaillances non-cohérent	138
IV-4- La variation de la conception du système	145
IV-5- La méthode de l'arbre des défaillances non-cohérent classique	147
IV-6- Conclusion.....	156
Conclusion générale et perspectives	158
La Bibliographie	160

Liste des figures

Figure I-1: Diagramme de l'emballlement thermique	10
Figure I-2: Diagramme de Semenov	13
Figure I-3: Scénario d'un emballlement thermique	15
Figure I-4: Les classes du scénario d'emballlement thermique obtenues en combinant les quatre niveaux de température	21
Figure I-5: Organigramme des conséquences d'un emballlement thermique.....	24
Figure I-6: Carte du monde avec les pays ayant le taux d'accidents et d'emballlement thermique le plus élevé comme origine.....	27
Figure I-7: Emballlement thermique par type de réaction	32
Figure I-8: Les causes des accidents des raffineries de Skikda et Arzew	35
Figure I-9: La carte de répartition des gisements de pétrole (vert) et du gaz (rouge) ainsi que les réseaux de transport les reliant aux terminaux situés au nord de l'Algérie	36
Figure I-10: La carte de localisation des principales raffineries et des zones d'entreposage...	37
Figure II-1: Exemple d'arbre des défaillances cohérent	51
Figure II-2: Les étapes de l'élaboration de l'arbre des défaillances	54
Figure II-3: Exemple d'une porte logique ET	60
Figure II-4: Un système en série	61
Figure II-5: Exemple d'une porte logique OU	61
Figure II-6: Un système en parallèle	61
Figure II-7: La fonction de structure monotone et croissante	62
Figure II-8: Exemple d'un système en série/parallèle	63
Figure II-9: Exemple d'un arbre des défaillances	69
Figure II-10: L'indisponibilité d'un composant irréparable	72
Figure II-11: L'indisponibilité d'un composant réparable	73
Figure II-12: L'indisponibilité d'un composant en attente (standby)	74
Figure II-13: Exemple d'arbre des défaillances	83
Figure II-14: Le diagramme de décision binaire correspondant à l'ADD de la figure II-13 ...	83
Figure II-15: Exemple d'un BDD du top event T	85
Figure III-1: La fonction de structure non-cohérente	96
Figure III-2 : Le système multitâche	100
Figure III-3 : Arbre des défaillances cohérent pour le système multitâche	100
Figure III-4 : La branche de transfert pour LU	101

Figure III-5 : L'arbre des défaillances cohérent de la sortie 4	104
Figure III-6 : Le transfert de la porte P4 de l'ADD cohérent de la sortie n°4	105
Figure III-7 : L'ADD non-cohérent de la sortie n°4	106
Figure III-8 : Le transfert de la porte P6 de l'ADD non-cohérent	107
Figure III-9 : Un exemple de la porte logique XOR	108
Figure III-10 : L'arbre des défaillances équivalent à la porte "XOR"	109
Figure III-11 : L'arbre des défaillances non-cohérent de la porte "OU"	111
Figure III-12 : L'équivalent de l'arbre des défaillances non-cohérent de la porte "OU"	111
Figure III-13 : L'arbre des défaillances non-cohérent de la porte "ET"	112
Figure III-14 : L'équivalent de l'arbre des défaillances non-cohérent de la porte "ET"	112
Figure III-15 : L'ADD non-cohérent en propageant la porte "NOT" vers les événements de base	113
Figure III-16 : Le transfert de la porte P2	114
Figure III-17 : Exemple d'application du théorème du consensus	115
Figure IV-1 : La description de la méthode proposée	124
Figure IV-2 : L'approche semi-cohérente	129
Figure IV-3 : La structure du système de refroidissement du réacteur V501	131
Figure IV-4 : Le réacteur V501 de la synthèse de méthanol.....	131
Figure IV-5 : La boucle de synthèse	132
Figure IV-6 : L'arbre des défaillances cohérent	135
Figure IV-7 : L'arbre des défaillances cohérent de la turbine ne fonctionne pas	136
Figure IV-8 : L'arbre des défaillances cohérent pour le contrôle de température	136
Figure IV-9 : Le transfert de la porte P4.3 et P4.4 de l'arbre des défaillances cohérent du contrôle de la température	137
Figure IV-10 : L'arbre des défaillances semi-cohérent	138
Figure IV-11 : L'arbre des défaillances non-cohérent	140
Figure IV-12 : Sous-système non-cohérent, la turbine fonctionne	141
Figure IV-13 : Les facteurs d'importance de Fussell-Vesely	144
Figure IV-14 : La fiabilité pour une année	147
Figure IV-15 : La fiabilité pour une période de dix ans	147
Figure IV-16 : L'arbre des défaillances non-cohérent global	148
Figure IV-17 : L'arbre des défaillances non-cohérent pour le transfert P5 " pas de gaz de synthèse au niveau du compresseur"	149

Figure IV-18 : L'arbre des défaillances non-chérent pour la porte P6 "Le compresseur K402 ne fonctionne pas"	150
Figure IV-19 : L'arbre des défaillances non-cohérent pour le transfert P3 "l'absence de débit de gaz de synthèse"	151
Figure IV-20 : L'arbre des défaillances non-cohérent pour le transfert P4 "Défaillance du contrôle de la température"	151
Figure IV-21 : L'arbre des défaillances non-cohérent pour le lit 1	152
Figure IV-22 : L'arbre des défaillances non-cohérent pour le lit 2	153
Figure IV-23 : L'arbre des défaillances non-cohérent pour le lit 3	154
Figure IV-24 : L'arbre des défaillances non-cohérent pour le lit 4	155
Figure IV-25 : L'arbre des défaillances non-cohérent " La turbine fonctionne"	156
Figure IV-26 : L'arbre des défaillances non-cohérent du transfert "pas de vapeur"	157

Liste des tableaux

Tableau I-1 : Exemple de valeurs de montée adiabatique en température	17
Tableau I-2 : Les principales catastrophes chimiques majeures dans le monde	29
Tableau I-2 : Les principales catastrophes chimiques majeures dans le monde (suite)	30
Tableau I-3 : Les principales réactions chimiques impliquant un emballement thermique	31
Tableau I-4 : Les zones pétrochimiques de l'Algérie	34
Tableau II-1 : Les principales lois de l'algèbre de Boole	67
Tableau II-2 : La table de vérité de $\Phi(x)$	77
Tableau II-3 : Résumé des principaux facteurs d'importance	92
Tableau III-1 : Les états de défaillances du système de détection de gaz	102
Tableau IV-1 : Les composants, leurs modes de défaillance, leurs taux de défaillance et leurs MTTR	133
Tableau IV-2 : Les facteurs d'importance pour l'arbre des défaillances cohérent.....	135
Tableau IV-3 : Les résultats de l'analyse qualitative	142
Tableau IV-4 : Les résultats de l'analyse quantitative pour une période de 10 ans	143
Tableau IV-5 : Les facteurs d'importance	144
Tableau IV-6 : Classement des principaux composants critiques	145
Tableau IV-7 : Les paramètres du système après modification de la conception	146
Tableau IV-8 : L'analyse quantitative après modification de la conception	146
Tableau IV-9 : Analyse qualitative de l'arbre des défaillances classique	154
Tableau IV-10 : Comparaison entre les deux méthodes	155

Nomenclatures

q_{ev} : La chaleur évacuée par le système de refroidissement ou la puissance de refroidissement

q_{re} : La chaleur produite par la réaction ou puissance thermique de la réaction

MTSR : Température maximale de la réaction de synthèse (Maximum Temperature of the Synthesis Reaction)

VCE : Vapor Cloud Explosion (Explosion d'un nuage de vapeur)

Feu éclair : Une combustion rapide et soudaine d'un nuage de gaz ou de vapeurs inflammables qui s'est mélangé avec l'air et qui s'enflamme au contact d'une source d'ignition (étincelle, flamme, surface chaude...).

Les limites d'explosivité : ou limites d'inflammabilité désignent la plage de concentration d'un gaz ou d'une vapeur inflammable dans l'air à l'intérieur de laquelle un mélange peut s'enflammer ou exploser en présence d'une source d'ignition.

Acronymes

ADD Arbre des défaillances

FTA Fault tree analysis

ADD-c Arbre des défaillances cohérent

ADD-nc Arbre des défaillances non-cohérent

MTTR Mean time to repair (le temps moyen avant réparation)

Introduction Générale

Depuis la première révolution industrielle, amorcée au milieu du XVIIIe siècle, l'humanité a connu une transformation profonde de ses structures économiques et productives. En l'espace de quelques décennies, les sociétés sont passées d'une économie majoritairement agraire, fondée sur des pratiques agricoles traditionnelles, à une production industrielle de biens manufacturés à grande échelle. Cette transition a été rendue possible par les avancées techniques majeures de l'époque, notamment l'invention et le déploiement de la machine à vapeur, qui ont permis une mécanisation accrue des procédés de production et une augmentation significative des performances des installations industrielles (Brasseul, 1998; Dakkoune et al., 2019; Verley, 1985).

La deuxième révolution industrielle, caractérisée par l'exploitation intensive des énergies fossiles notamment le pétrole, a conduit à l'émergence de nouveaux secteurs industriels, parmi lesquels la pétrochimie occupe une place centrale. Pilier majeur de l'industrie moderne, la pétrochimie transforme les ressources fossiles en matières intermédiaires essentielles, servant de base à la fabrication d'une large gamme de produits du quotidien, tels que les médicaments humains et vétérinaires, les pesticides, les cosmétiques, les matériaux destinés à l'électronique, à l'aéronautique ainsi qu'à l'industrie textile (Brasseul, 1998; Larsen and Tilsted, 2024; Zhang et al., 2024)

La pétrochimie constitue un secteur industriel stratégique caractérisé par une croissance continue. Au cours du dernier demi-siècle, ce secteur a enregistré un développement particulièrement rapide comparativement aux autres branches industrielles, auxquelles il fournit l'essentiel des matières nécessaires à la production d'une large gamme de biens. Les produits issus de l'industrie pétrochimique sont omniprésents dans la vie quotidienne et occupent une place centrale dans les sociétés modernes. Toutefois, la synthèse de ces produits repose sur la mise en œuvre de procédés chimiques et physiques complexes, impliquant des conditions opératoires sévères (températures et pressions élevées, réactions exothermiques, manipulations de substances dangereuses), susceptibles de générer des risques significatifs pour la sécurité des personnes, la protection de l'environnement et l'intégrité des installations industrielles (Guglielmo, 1956; Musset, 1962; Tennci et Souiah, 2019).

Ces procédés transforment les matières premières en produits finis en moyen de réacteurs, qui sont des enceintes fermées fonctionnant généralement sous des conditions de température et de pression très élevées. Les réacteurs constituent le véritable cœur des procédés industriels.

Ils sont le siège des réactions chimiques, majoritairement exothermiques, impliquant une libération importante de chaleur. La maîtrise de cette énergie thermique est indispensable afin de maintenir le réacteur dans des conditions de fonctionnement sûres et d'éviter toute dérive vers des situations dangereuses (Stoessel, 2021).

Le contrôle des réacteurs chimiques au moyen de systèmes de refroidissement fiables joue un rôle fondamental dans le maintien de l'équilibre thermique entre la chaleur générée par les réactions chimiques et celle évacuée par le système de refroidissement. Toute défaillance ou perte de ce système entraîne une rupture de cet équilibre, conduisant à une accumulation incontrôlée de chaleur susceptible de provoquer un emballement thermique, phénomène particulièrement redouté dans l'industrie en raison de ses conséquences potentiellement graves (Berdouzi, 2017; Stoessel, 2021).

L'occurrence de l'emballement thermique et, plus largement, des défaillances du contrôle thermique des réacteurs contribue de manière significative à la perception négative de l'industrie chimique et pétrochimique, fréquemment considérée comme un secteur à haut niveau de risque ; en effet, les incidents et accidents associés à ce phénomène peuvent engendrer des conséquences majeures sur l'environnement, la santé humaine et la sécurité des installations (Berdouzi, 2017). Plusieurs études quantitatives confirment l'importance de ce risque : selon Alex Kummer et Tamas Varga (Kummer et Varga, 2021), sur la base des travaux de Balasubramanian et Louvar (2002). L'emballement thermique serait à l'origine de 26,5 % des accidents recensés dans l'industrie chimique et pétrochimique à l'échelle mondiale. En France, ce phénomène représenterait environ 25 % des accidents dans ce secteur, d'après une étude menée par Dakkoune et ses collaborateurs en 2019 (Dakkoune et al., 2019).

De nombreux accidents, mortels et non mortels, survenus au cours des dernières décennies, ont mis en évidence la gravité du risque d'emballement thermique dans l'industrie chimique et pétrochimique. Parmi les événements les plus marquants figurent l'accident de Flixborough survenu le 1er juin 1974 au Royaume-Uni, qui a entraîné la mort de 28 employés, de nombreux blessés graves, ainsi que d'importants dommages matériels et des impacts significatifs sur la population voisine. Deux ans plus tard, le 10 juillet 1976, un accident s'est produit à Seveso en Italie, où un rejet massif de substances toxiques a conduit à l'exposition de plus de 37 000 personnes ; bien qu'aucun décès immédiat n'ait été enregistré au sein de la population, cet événement a provoqué de graves atteintes sanitaires et environnementales. Enfin, le 3 décembre 1984, la catastrophe industrielle de Bhopal, en Inde, constitue l'un des accidents le plus dramatique de l'histoire de l'industrie chimique : la libération d'environ 40 tonnes de gaz

toxiques dans l'atmosphère a causé la mort de plus de 10 000 personnes et des séquelles sanitaires majeures à long terme (Dakkoune, 2019).

En Algérie, aucun accident majeur attribué explicitement à un phénomène d'emballlement thermique n'a, à ce jour, été officiellement recensé. Néanmoins, plusieurs accidents significatifs impliquant l'industrie chimique et pétrochimique ont été enregistrés au cours des dernières décennies. Parmi eux, l'accident de Skikda survenu en 2004 demeure l'un des plus marquants, ayant causé la mort de 27 personnes et fait 74 blessés. Cet événement a été suivi par d'autres incidents notables, notamment à Arzew en 2010, à Skikda en 2013 (Chettouh et al., 2016), ainsi que par l'accident survenu à Arzew le 29 juillet 2024, qui a entraîné un blessé.

La récurrence de ces accidents et incidents industriels tend à s'accroître avec l'augmentation du nombre d'installations chimiques et pétrochimiques, estimé à environ 4000 unités à l'échelle nationale majoritairement implantées en zone urbaine (Mohamed-Chérif et Chacha, 2015). Ce contexte renforce la nécessité d'une maîtrise rigoureuse des risques industriels majeurs, en particulier ceux associés aux procédés à fort potentiel énergétique, tels que les phénomènes d'emballlement thermique.

La concentration élevée d'installations chimiques et pétrochimiques, combinée à la proximité des zones habitées, soulève une problématique majeure de sécurité industrielle. Cette situation conduit à s'interroger sur les conséquences potentielles d'un accident grave et sur la capacité des dispositifs de prévention et de protection existants à en limiter les effets. En particulier, en cas d'emballlement thermique accompagné d'un dégagement de gaz toxiques ou d'une explosion, la protection des travailleurs, des populations riveraines et de l'environnement constitue un enjeu central. Cette problématique met en évidence la nécessité d'une analyse approfondie des scénarios accidentels et du renforcement des stratégies de maîtrise des risques majeurs.

Cette thèse a pour premier objectif d'analyser le système de refroidissement d'un réacteur chimique appartenant à la compagnie CP1Z du groupe SONATRACH, située à Arzew. Elle cherche à répondre à la problématique : dans quel mesure l'amélioration de la fiabilité du système de refroidissement permet-elle d'éliminer, ou à défaut de réduire au minimum, le risque d'apparition d'un emballlement thermique dans un réacteur chimique ?

Le second objectif de cette thèse consiste à développer une approche méthodologique visant à identifier les éléments incohérents dans un système complexe, qualifié de non cohérent, c'est-à-dire les composants ou sous-systèmes dont l'état de fonctionnement est en contradiction avec celui requis pour assurer le bon fonctionnement global du système. À cette fin, l'étude s'appuie sur l'utilisation des arbres de défaillance cohérents (ADD-c) (c-FTA) comme outil de base pour la détection des événements défaillants, susceptibles de mettre le système en état de dérive. Cette approche est ensuite étendue par l'intégration des arbres de défaillance non cohérents (ADD-nc) (nc-FTA), afin de représenter de manière plus réaliste le comportement des systèmes industriels complexes.

Les arbres de défaillance non cohérents intègrent, dans un même modèle et pour chaque événement de base, à la fois l'état défaillant et l'état fonctionnel du composant. Cette représentation plus réaliste du comportement des systèmes non-cohérents se traduit par une augmentation significative du nombre d'événements à considérer, ainsi que par un accroissement notable du temps de calcul.

Afin de surmonter ces limitations, l'approche proposée dans cette thèse, désignée sous le terme d'arbre des défaillances semi-cohérent, vise à concilier réalisme de modélisation et efficacité computationnelle. Cette méthode permet non seulement d'identifier les composants présentant un comportement incohérent, mais également de réduire la taille de l'arbre des défaillances non-cohérent et d'optimiser les temps de calcul, tout en conservant une représentation fidèle des mécanismes de défaillance conduisant à l'emballement thermique

Le manuscrit est structuré en quatre chapitres, organisé de manière progressive afin de répondre aux objectifs de la thèse et à la problématique de la maîtrise du risque d'emballement thermique dans les procédés chimiques.

Le premier chapitre est consacré à l'étude du phénomène de l'emballement thermique. Il en analyse les causes, les mécanismes physiques et chimiques sous-jacent, ainsi que les conséquences potentielles sur la sécurité des personnes, des installations industrielles et de l'environnement.

Le deuxième chapitre présente les arbres des défaillances cohérents en tant qu'outil fondamental de l'analyse de sûreté de fonctionnement. Il en décrit les principes, la structure, la méthode de construction et leur importance dans l'analyse des risques.

Le troisième chapitre est dédié aux arbres de défaillance non cohérents. Il met en évidence leur spécificité, leurs avantages et leurs limites, présente la méthode de leur construction et souligne leur apport dans la modélisation des systèmes complexes non-cohérents.

Enfin, le quatrième chapitre présente la méthode proposée et expose son application dans le cadre de cette thèse. Il fournit les résultats de l'analyse menée sur le système de refroidissement du réacteur étudié, l'implémentation des arbres des défaillances semi-cohérents, ainsi qu'une comparaison avec la méthode classique, accompagnée d'une discussion des performances obtenues de cette méthode.

Chapitre I

État de l'art de l'emballlement thermique

Sommaire du chapitre I

I-1- Introduction	7
I-2- L'emballlement thermique	8
I-3- La théorie de l'emballlement thermique	9
I-3-1- Le bilan thermique	10
1- La production de chaleur	10
2- L'élimination de chaleur.....	11
3- L'accumulation de chaleur	12
I-3-2- Le diagramme de SEMENOV.....	13
I-3-3- Le scénario d'un emballlement thermique	14
I-4- Les classes critiques des scenarii d'un emballlement thermique	20
I-5- Les conséquences de l'emballlement thermique	23
I-6- Les causes de l'emballlement thermique.....	26
I-7- Accidentologie	28
1-7-1- Accidentologie dans le monde.....	28
I-7-2- Les principales réactions ayant été impliquées dans des accidents recensés	31
1-7-3- L'accidentologie en Algérie	32
I-8- Réglementation.....	37
I-8-1- La législation européenne.....	38
I-8-2- La législation algérienne	40
I-9- Conclusion.....	45

I-1-Introduction

L'emballement thermique est un phénomène redouté dans de nombreux secteurs industriels, notamment ceux impliquant la manipulation de substances chimiques et des procédés à haut potentiel énergétique. Au cours de la dernière décennie, environ 120 articles scientifiques sont publiés chaque année sur ce sujet (Kummer et Varga, 2021), témoignant de l'importance et de l'actualité de cette problématique pour la communauté scientifique et industrielle.

Ce phénomène représente l'un des risques majeurs de l'industrie chimique, reconnu depuis longtemps comme une cause principale d'accidents industriels graves. Il se traduit fréquemment par des pertes humaines, incluant des blessures, des décès, ainsi que des conséquences à long terme telles que des malformations congénitales affectant les générations présentes et futures. Par ailleurs, l'emballement thermique engendre des dommages matériels considérables et des impacts environnementaux significatifs (Barton et Nolan, 1989).

L'emballement thermique résulte d'une augmentation incontrôlée de la température dans un système confiné, généralement due à une réaction chimique exothermique dont la vitesse dépasse la capacité de dissipation de chaleur. Ce déséquilibre conduit souvent à une explosion thermique, accompagnée de la libération soudaine d'énergie et de gaz toxiques ou inflammables (Stoessel, 2021).

Les connaissances sur le phénomène de l'emballement thermique ont considérablement progressé ces dernières années. Cependant, ces avancées ne sont pas toujours pleinement intégrées dans les pratiques industrielles, ce qui entraîne aujourd'hui de graves défaillances et dysfonctionnements dans les processus. L'emballement thermique est responsable de 26,5% des accidents dans l'industrie pétrochimique (Kummer et Varga, 2021), tandis que les emballlements de réacteurs représentent 25% des accidents dans l'industrie française (Dakkoune, 2019; Dakkoune et al., 2019).

En Algérie, bien que les données restent imprécises, plusieurs accidents liés au vieillissement des installations ont été recensés depuis 2003. Parmi eux, l'accident survenu à Skikda en 2004, qui a causé la mort de plus de 27 personnes et fait plus de 75 blessés, illustre la gravité de ce problème. Un autre incident notable a eu lieu à Arzew en 2007, soulignant une fois de plus les risques associés à l'état des infrastructures (Chettouh et Hamzi, 2014).

I-2-L'emballlement thermique

L'emballlement thermique est « la conséquence de la perte de contrôle de la température d'une substance chimique, d'un mélange de réactifs et de produits ou d'un procédé dans une enceinte » (Laurent, 2011).

D'après (Wilday et Etchells, 1998), l'emballlement de réactions chimiques peut être défini comme un système réactionnel thermiquement instable qui présente une augmentation croissante de la pression, de la température et de la vitesse de réaction, qui peut donner lieu à une explosion, c'est l'explosion thermique.

L'emballlement thermique est une des conséquences mécaniques qui peuvent survenir dans une enceinte fermée, notamment lors de réactions chimiques ou physiques exothermiques. Il se manifeste généralement par la perte de contrôle de la réaction normale en une réaction habituelle, évoluant vers une réaction incontrôlée à la suite d'une augmentation indésirable de la température (Andriani et al., 2025; Jiang et al., 2016; Kummer et Varga, 2021; Wen et al., 2025; Yu et al., 2023; Zhang et al., 2021). Cette situation résulte d'un déséquilibre entre la chaleur produite par la réaction et la capacité du système à l'évacuer, particulièrement en cas de défaillance du système de refroidissement.

Dans la plupart des cas, les augmentations de température restent modérées et n'engendrent pas de conséquences majeures. Cependant, en cas d'évolution vers une explosion thermique, le phénomène se traduit par la libération soudaine d'une grande quantité d'énergie, souvent associée à une importante émission de gaz inflammables ou toxiques. Cette pression accrue peut entraîner l'explosion de l'enceinte de réaction, la destruction partielle ou totale de l'installation industrielle, la dispersion massive de gaz dangereux, ainsi que des impacts graves sur l'environnement et les populations riveraines (Benaissa, 2006 ; Benaissa et al. 2008 ; Berdouzi, 2017 ; Berdouzi et al. 2017 ; Broccanello, 2016 ; Casson, 2012 ; Kouhili et al. 2023).

Les causes de l'emballlement thermique sont diverses et variées. Ce phénomène survient toutefois le plus fréquemment à la suite d'une défaillance du système de refroidissement : selon (Gustin, 1991), 75 % des cas d'emballlement thermique sont attribués à un arrêt ou à une panne du système de refroidissement. La figure I-1 illustre le phénomène de l'emballlement thermique.

Toutes les installations industrielles susceptibles de contenir un mélange de substances chimiques potentiellement instables peuvent être vulnérables à l'emballlement thermique, qu'il s'agisse de production, de transformation physiques, de stockage, de transport ou de conditionnement (Dakkoune, 2019; Vince, 2000)

- Les réacteurs chimiques de tous types : il s'agit des équipements utilisés pour effectuer des réactions chimiques à l'échelle industrielle, notamment les réacteurs discontinus (batch), semi-continus, et continus. Dans ces dispositifs, l'emballlement thermique peut se produire si la chaleur libérée lors de la réaction dépasse la capacité de refroidissement ou de dissipation de chaleur, ce qui entraîne une augmentation incontrôlée de la température interne. L'accident de Seveso était dû à un emballlement d'un réacteur chimique.
- Les installations de transformation physiques : Cette catégorie regroupe des équipements comme les évaporateurs (utilisés pour concentrer des solutions), les colonnes de distillation (séparation de mélanges liquides) et leurs bouilleurs, les cristalliseurs (formation de cristaux à partir d'une solution) et les centrifugeuses (séparation de phases). Bien que la principale transformation soit physique, la présence de certaines substances chimiques réactives ou instables peut entraîner un emballlement thermique en cas de dysfonctionnement.
- Les dispositifs de stockage et de transport : Les citernes, fûts, sacs, conduites, vannes, et pompes servant au stockage ou à l'acheminement de substances chimiques exposent également au risque d'emballlement thermique, particulièrement si la stabilité thermique des produits n'est pas assurée ou en cas de contamination accidentelle. L'accident de Bhopal (Inde, 1984), AZF (France, 2001), et Beyrouth (Liban, 2020) sont des emballlements thermiques de stockage de produits chimiques.
- Les systèmes de conditionnement : Broyeurs, mélangeurs, sécheurs et autres équipements de séparation ou de conditionnement peuvent générer de la chaleur par frottement, compression, ou réaction chimique accidentelle, favorisant un emballlement si le processus n'est pas contrôlé.

I-3- La théorie de l'emballlement thermique

Le phénomène d'emballlement thermique se produit lorsqu'un déséquilibre survient entre la chaleur produite par une réaction et la chaleur évacuée par le système de refroidissement dans une enceinte fermée. En d'autres termes un emballlement thermique est toujours le résultat d'une élimination de chaleur insuffisante comparée à la production de chaleur. Il est donc essentiel de comprendre comment une réaction peut passer d'un fonctionnement normal à un régime d'emballlement. Pour cela, il est primordial de maîtriser les éléments clés de la théorie de ce phénomène.

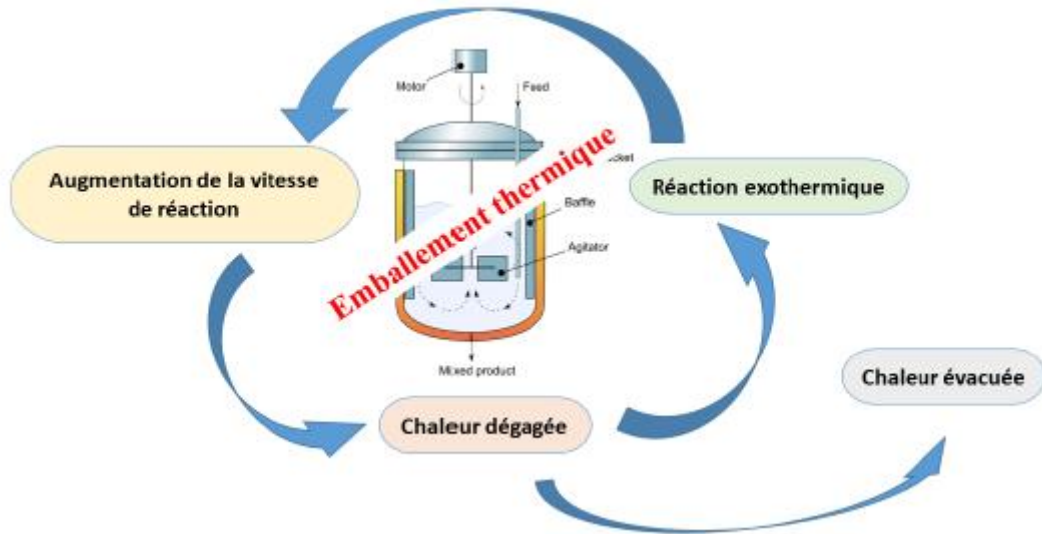


Figure I-1 : Diagramme de l'emballement thermique (Dakkoune, 2019)

I-3-1- Le bilan thermique

Le bilan thermique est la différence entre la chaleur produite par la réaction et la chaleur éliminée par le système de refroidissement dans un réacteur. Cette différence donne la chaleur accumulée. Le réacteur est dit stable si la chaleur accumulée est négative.

$$\{\text{La chaleur accumulée}\} = \{\text{La chaleur produite}\} - \{\text{La chaleur éliminée}\}$$

Autrement dit, si la quantité de chaleur éliminée (q_{ev}) est supérieure ou égale à la chaleur produite (q_{re}) le système est dit stable, sinon le système est instable.

$$q_{ev} \geq q_{re} \Rightarrow \text{Le système est stable}$$

$$q_{ev} < q_{re} \Rightarrow \text{Le système est instable}$$

1- La production de chaleur

La production de chaleur ou puissance thermique d'une réaction (q_{re}) est proportionnelle à la vitesse de réaction, au volume du mélange réactionnel et à l'enthalpie molaire de la réaction. (Dakkoune, 2019 ; Demissy et al. 2005 ; Stoessel, 2021 ; Villemur et al. 2019 ; Vince, 2000). L'enthalpie de la réaction correspond à la chaleur dégagée ou absorbée par la transformation opérée lors de la réaction. C'est une valeur importante qui permet de connaître si la réaction est endothermique $\Delta H_R > 0$ ou exothermique $\Delta H_R < 0$, elle conditionne la valeur de la chaleur produite (q_{re}). Les réactions exothermiques se sont celles qui présentent un potentiel du risque d'emballement thermique.

$$q_{re} = r \cdot V \cdot (-\Delta H_R) \quad (1)$$

Avec :

q_{re} = la chaleur produite ou puissance thermique de la réaction, exprimée en watt (W).

r = vitesse de réaction (disparition des réactifs pour donner des produits en $(\text{mol} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1})$)

V = volume du milieu réactionnel, en m^3

ΔH_R = enthalpie de la réaction en $(\text{J} \cdot \text{mol}^{-1})$

La vitesse de réaction, d'après la loi d'Arrhenius, est une fonction exponentielle de la température. Pour une réaction simple du premier ordre, la vitesse s'écrit :

$$r = k_0 \exp \left[\frac{-E}{RT} \right] f(X) \quad (2)$$

Avec :

k_0 = facteur de fréquence en s^{-1}

E = énergie d'activation de la réaction en $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$

R = constante des gaz parfaits dont la valeur vaut $8.314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

T = température du milieu réactionnel en kelvin (K)

$f(X)$ = fonction de taux d'avancement de la réaction

La loi d'Arrhenius établit que la vitesse d'une réaction chimique augmente de façon exponentielle avec la température ; par exemple, elle double pour une augmentation de la température de 10 K, ce qui met en évidence le caractère dangereux de ces réactions en cas de perte de refroidissement.

L'équation de la production de chaleur devient :

$$q_{re} = k_0 \exp \left[\frac{-E}{RT} \right] f(X) \cdot V \cdot (-\Delta H_R) \quad (3)$$

La chaleur produite est proportionnelle à la vitesse, cette dernière étant une fonction exponentielle de la température. Ainsi, la puissance thermique croît d'une façon exponentielle avec l'augmentation de la température.

2- L'élimination de chaleur

La chaleur évacuée par le système de refroidissement, également appelée puissance de refroidissement du réacteur q_{ev} est proportionnelle au gradient de température établi entre le milieu réactionnel et le système de refroidissement, à la surface d'échange thermique, ainsi

qu'au coefficient de transfert de chaleur, elle constitue ainsi une fonction linéaire de la température (Demissy et al., 2005; Stoessel, 2021; Villemur et al., 2019).

$$q_{ev} = US (T - T_c) \quad (4)$$

Avec :

q_{ev} = la puissance de refroidissement en watt (W).

U = le coefficient de transfert de chaleur en $W.m^{-2}.K^{-1}$

S = la surface d'échange thermique en m^2

T = la température du milieu réactionnel en K

T_c = la température du système refroidissement (caloporteur) en K

3- L'accumulation de chaleur

L'accumulation de chaleur est la différence entre la chaleur produite et la chaleur évacuée (Broccanello, 2016; Stoessel, 2021; Vince, 2000).

$$q_{ac} = q_{re} - q_{ev} \quad (5)$$

Elle s'exprime par la relation suivante :

$$q_{ac} = m.C_p \cdot \frac{dT}{dt} \quad (6)$$

Avec :

q_{ac} = la puissance de l'accumulation du système en W

m = la masse du milieu réactionnel en Kg

C_p = la capacité calorifique massique en $J. Kg^{-1}.K^{-1}$

$\frac{dT}{dt}$ = la vitesse de montée en température du milieu réactionnel en $K.s^{-1}$

Ce qui se traduit par :

$$m.C_p \cdot \frac{dT}{dt} = k_0 \exp \left[\frac{-E}{RT} \right] f(X) \cdot V \cdot (-\Delta H_R) - US (T - T_c) \quad (7)$$

Le contrôle de la température vise à éviter une accumulation trop excessive de la chaleur dans le milieu. Le bilan thermique est équilibré lorsque la puissance thermique de la réaction (q_{re}) est égale à la puissance éliminée (q_{ev}) (Chen et al., 2022).

$$(q_{re}) = (q_{ev})$$

Ceci se produit aux intersections de la courbe de Semenov.

I-3-2- Le diagramme de SEMENOV

Le physico-chimiste russe Nikolai Semenov (Semenov, 1928) est considéré comme le pionnier dans l'étude de l'emballement thermique. Ses travaux ont constitué une base fondamentale pour les recherches ultérieures dans ce domaine. Il a proposé une représentation graphique mettant en relation la chaleur produite par la réaction chimique et la chaleur évacuée par le système de refroidissement. Dans ce diagramme, la puissance générée suit une loi exponentielle tandis que la puissance dissipée évolue linéairement avec la température. Cette relation est illustrée à la figure I-2.

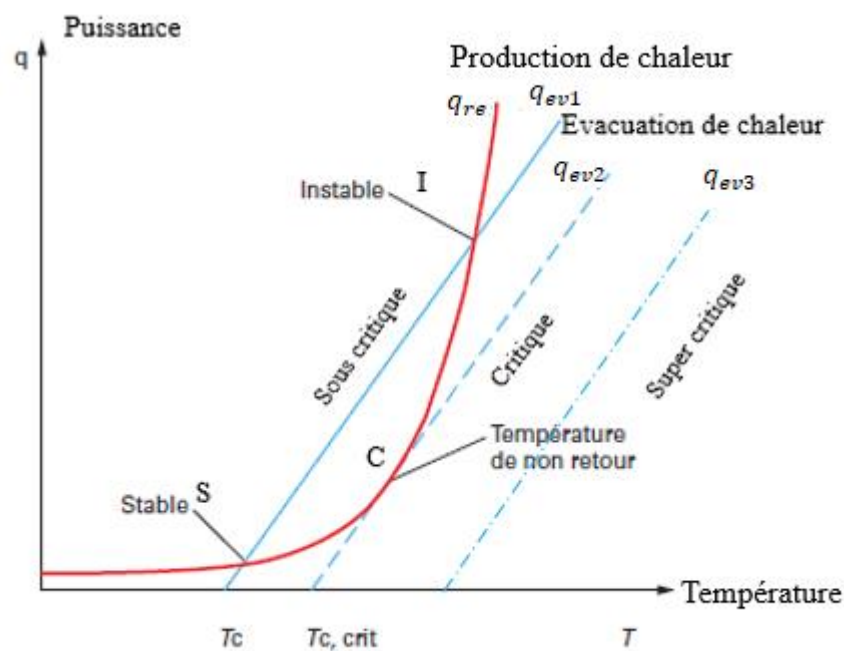


Figure I-2 Diagramme de Semenov

Le diagramme de Semenov met en évidence l'existence de deux points d'équilibre thermique, où la chaleur produite par la réaction est égale à celle évacuée par le système de refroidissement. À ces points, la température reste stationnaire, car le terme d'accumulation de chaleur est nul. Parmi ces deux points, seul le premier est considéré comme stable (le point S).

En effet, toute élévation temporaire de température entraîne alors une dissipation de chaleur supérieure à la production, ce qui ramène le système à son état initial. Inversement, une diminution de température provoque une production de chaleur supérieure à la dissipation, ramenant également le système à l'équilibre.

En revanche, le second point est instable (le point I). Toute élévation, même minime, de la température conduit à une production de chaleur supérieure à la dissipation, provoquant alors une augmentation continue et incontrôlée de la température du réacteur, ce qui contribue au développement des conditions de l'emballement thermique. Ce point est appelé **point de non-retour** (Benaissa, 2006; Berdouzi, 2017; Demissy et al., 2005; Giovannini et al., 2000).

Si la température continue d'augmenter, alors les deux points S et I se confondent et deviennent un seul point tangent à la courbe de production de chaleur (le point C) ; il s'agit alors d'un équilibre instable ou « état critique ». La température du système de refroidissement continue à augmenter et atteint sa valeur critique (T_c , crit) et il n'existe plus de point d'équilibre stable : le flux de chaleur produit dépasse en permanence la capacité de dissipation. Ce phénomène correspond au régime critique et se dirige vers l'emballement thermique. (Demissy et al. 2005 ; Kummer et Varga, 2021 ; Laurent, 2011 ; Stoessel, 2021 ; Vince, 2000 ; Yang et al. 2024).

Si la chaleur évacuée par le système de refroidissement continue d'augmenter et dépasse la température critique T_c , comme l'illustre la troisième droite (q_{ev3}) qui ne croise pas la courbe représentant la chaleur produite, il s'agit alors d'un régime supercritique, dans lequel l'équation du bilan thermique ne possède aucune solution. Dans ce cas, l'emballement thermique devient inévitable. (Demissy et al. 2005 ; Laurent, 2011 ; Stoessel, 2021).

I-3-3- Le scénario d'un emballement thermique .

Le scénario d'emballement thermique proposé par Gyax (1988) et repris par Stoessel (1993) est largement utilisé comme base pour l'évaluation systématique des risques thermiques des réactions chimiques exothermiques, surtout dans le cas d'une perte du système de refroidissement. Ce scénario représente une situation « pire cas », car, en l'absence d'échange thermique avec l'environnement (c'est-à-dire en conditions adiabatiques), toute la chaleur générée par la réaction s'accumule dans le système, ce qui peut conduire à une augmentation rapide de la température et du taux de réaction, alimentant ainsi un cercle vicieux

d'emballlement thermique (Gygax, 1988; Kummer et al., 2020; Kummer et Varga, 2021; Laurent, 2011; Stoessel, 2021, 1993)

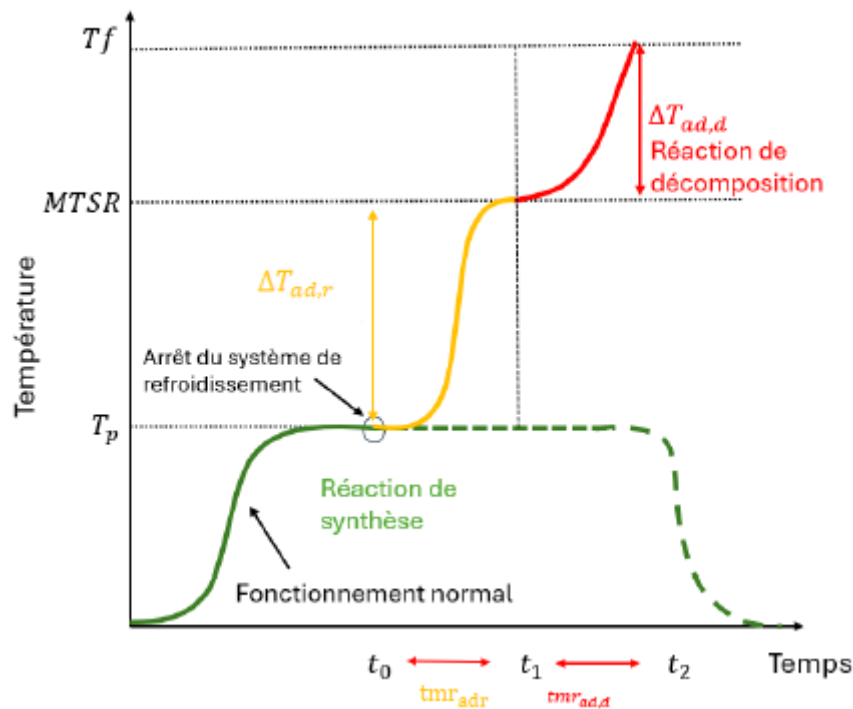


Figure I-3 : Scénario d'un emballlement thermique (Alcantara, 2024).

La figure I-3 illustre ce scenario. La réaction est effectuée à la température du procédé T_p . Une perte de refroidissement à l'instant t_0 provoque une augmentation de la température due à la réaction principale, rendant le système adiabatique, il n'y a plus d'échange de chaleur avec l'extérieur. La température continue d'augmenter jusqu'à atteindre la température maximale de la réaction de synthèse MTSR (Maximum Temperature of the Synthesis Reaction) entre t_0 et t_1 (Demissy et al., 2005; Gygax, 1988; Shen, 2020; Stoessel, 1993).

À cette température, si tous les composants présents sont stables, la réaction s'achève et un retour vers la température ambiante s'opère. En revanche, si des composés instables sont présents à la température MTSR, ils se décomposent, libérant une chaleur supplémentaire qui provoque une seconde augmentation de la température entre t_1 et t_2 , jusqu'à atteindre la valeur finale T_f .

Avec :

$\Delta T_{ad,r}$ = La montée en température en fonctionnement adiabatique, due à la réaction principale

$\Delta T_{ad,d}$ = La seconde montée en température en fonctionnement adiabatique due aux réactions secondaires.

Les paramètres importants pour l'évaluation de la gravité d'un emballement thermique sont :

- 1- ΔT_{ad} : ce paramètre, défini comme le rapport entre l'enthalpie de réaction et la capacité thermique totale du système, constitue un indicateur fondamental de la gravité potentielle d'un emballement thermique. Il permet d'une part d'estimer la température maximale pouvant être atteinte dans un équipement industriel où des réactions chimiques, prévues ou secondaires, sont susceptibles de se dérouler, et d'autre part d'apprécier la cinétique d'un éventuel emballement thermique. Des valeurs élevées de ce paramètre traduisent le risque d'atteindre des températures de décomposition (Alcantara, 2024; Demissy et al., 2005; Giovannini et al., 2000; Hernandez, 2020; Kummer et al., 2020; Laurent, 2011; Stoessel, 2021; Vince, 2000).

$$\Delta T_{ad} = \frac{\Delta H}{c_p} \quad (8)$$

À titre d'exemple, le tableau I-1 montre des valeurs respectives de montée adiabatique en température dans un milieu organique d'une réaction désirée et d'une réaction consécutive de décomposition.

Tableau I-1 : Exemple de valeurs de montée adiabatique en température

Réaction	désirée	décomposition
ΔH_R	100 KJ.Kg ⁻¹	2000 KJ.Kg ⁻¹
ΔT_{ad}	50 k	1000 k
Masse de méthanol évaporé par kg de masse réactionnelle	0.1 kg	1.8 kg

Ces valeurs reflètent l'ampleur potentielle d'un emballement thermique provoqué par des réactions secondaires (Laurent, 2011)

- 2- $t_{mr_{ad}}$: Le deuxième paramètre important est le temps nécessaire pour atteindre la vitesse maximum en conditions adiabatiques (Time to Maximum Rate adiabatic). Cet indicateur permet de quantifier la durée pendant laquelle l'emballement de réaction peut se développer. Il est donné par l'expression :

$$t_{mr_{ad,r}} = \frac{C_p R T_0^2}{Q_{max} E_{a,r}} \quad (9)$$

Avec :

ΔH = l'enthalpie de réaction en (KJ.Kg⁻¹)

C_p = la capacité calorifique en (J.Kg⁻¹.K⁻¹)

Q_{max} = la puissance thermique maximale en (W.Kg⁻¹)

T_0 = la température du milieu en (K)

$E_{a,r}$ = l'énergie d'activation de la réaction normale en (J.mol⁻¹)

R = la constante des gaz parfaits en (J.mol⁻¹)

- 3- MTSR : le troisième paramètre déterminant est la température maximale susceptible d'être atteinte après l'arrêt de la réaction de synthèse principale. Cet indicateur constitue un outil de prévision du comportement thermique du réacteur en cas de défaillance du système de refroidissement. À cette température, des réactions secondaires peuvent s'amorcer, entraînant une élévation supplémentaire de la température du réacteur, et pouvant conduire à une explosion thermique. Il est donc essentiel de connaître cette température critique.

Stoessel (1995) a montré que la température maximale de la réaction de synthèse (MTSR) dépend fortement du degré d'accumulation des réactifs non convertis et de l'augmentation adiabatique de la température à un instant donné. (Alcantara, 2024; Demissy et al., 2005; Giovannini et al., 2000; Hernandez, 2020; Kummer et al., 2020; Kummer et Varga, 2021; Laurent, 2011; Stoessel, 2021; Vince, 2000).

$$MTSR = T_p + X_{ac} \Delta T_{ad,r} \quad (10)$$

Avec :

T_p = la température du procédé

X_{ac} = le degré d'accumulation des réactifs non convertis

$\Delta T_{ad,r}$ = la température adiabatique de la réaction principale

Gygax (1988) a formulé six questions clés qui aident à évaluer le risque thermique. Représent et affinées par Stoessel (2009). Elles représentent six points clés qui aident à élaborer le scénario d'emballement et fournissent des indications pour la détermination des données requises pour l'évaluation du risque (Alcantara, 2024; Berdouzi, 2017; Gygax, 1988; Kummer et Varga, 2021; Stoessel, 2021).

Question 1 : La température de réaction peut-elle être maintenue par le système de refroidissement ?

Pendant le fonctionnement normal, il est essentiel d'assurer un refroidissement suffisant afin de contrôler la température du réacteur, et donc le déroulement de la réaction. C'est une question type qui doit être abordée lors du développement du procédé. Pour assurer le contrôle thermique de la réaction à l'échelle industrielle, la puissance du système de refroidissement doit être suffisante pour évacuer la chaleur dégagée dans le réacteur à tout instant.

Question 2 : Quelle température est atteinte lorsque la réaction principale s'emballe ?

Si après la défaillance du système de refroidissement, des réactifs non convertis sont toujours présents dans le mélange réactionnel, ils réagiront de manière incontrôlée et entraîneront une augmentation adiabatique de la température. Ainsi pour répondre à cette question, il faut étudier la conversion des réactifs en fonction du temps, afin de déterminer le degré d'accumulation des réactifs non convertis (X_{ac}). Le concept de MTSR (équation 10) a été développé à cette fin.

Question 3 : Quelle est la température atteinte après l'emballement de la seconde réaction ?

Étant donné que la température MTSR est supérieure à la température de processus prévue, des réactions secondaires peuvent se produire. Cela entraînera une nouvelle augmentation de la température due à la réaction secondaire incontrôlée. Les données thermiques de la réaction secondaire nous permettent de calculer l'augmentation adiabatique de la température de

décomposition ($\Delta T_{ad,d}$) et de déterminer la température finale à partir du niveau de température MTSR :

$$T_f = \text{MTSR} + \Delta T_{ad,d} \quad (11)$$

Cette température (T_f) donne une indication des conséquences possibles d'un emballement thermique.

Question 4 : À quel instant la défaillance du système de refroidissement a les pires conséquences ?

La défaillance du système de refroidissement est toujours inconnue. Il faut supposer qu'elle se produit aux pires moments, c'est-à-dire lorsque l'accumulation est maximale et /ou la stabilité thermique du mélange réactionnel est critique.

La quantité de réactifs non convertis et la stabilité thermique de la masse réactionnelle peuvent varier avec le temps. Il est primordial de savoir à quel instant l'accumulation et donc le potentiel thermique est le plus élevé.

Pour répondre à cette question, il faut connaître à la fois la réaction de synthèse et les réactions secondaires. Le pire scénario est défini par la combinaison d'une accumulation maximale et une stabilité thermique minimale. Les mesures de sécurité doivent en tenir compte.

Question 5 : Quel est le temps d'emballement de la réaction principale ?

Cette question porte sur la durée nécessaire à l'élévation de la température, depuis la température normale de fonctionnement (T_p) jusqu'à la température maximale atteinte lors de la réaction de synthèse le MTSR. La durée de la réaction principale peut être estimée à l'aide du taux de dégagement de chaleur et le $t_{mr_{ad,r}}$ (équation 9).

Question 6 : Quel est le temps de l'emballement de la réaction de décomposition ?

Cette question porte sur le temps nécessaire pour que la chaleur passe de la température maximale de réaction de synthèse (MTSR) à la perte totale de contrôle de la température (T_f).

À la température maximale de la réaction de synthèse (MTSR), des réactions secondaires peuvent se déclencher, entraînant un emballement incontrôlé dû à des réactions secondaires incontrôlées. Le temps nécessaire pour atteindre le taux de réaction maximal dans des conditions adiabatiques ($t_{mr_{ad,d}}$) est utilisé à cette fin est calculé par l'équation :

$$tmr_{ad,d} = \frac{C_p \cdot R \cdot (MTSR)^2}{Q_{MTSR} \cdot E_{a,d}} \quad (12)$$

Les six questions clés présentées ci-dessus permettent de s'assurer que les connaissances essentielles sur la sûreté thermique d'un processus sont disponibles. En ce sens, elles constituent une méthode systématique d'analyse de la sûreté thermique d'un processus et d'élaboration d'un scénario de défaillance du système de refroidissement.

Une fois le scénario défini, l'étape suivante consiste à évaluer les risques thermiques, ce qui nécessite des critères d'évaluation. Les critères utilisés pour évaluer la gravité et la probabilité sont présentés ci-dessous.

I-4 - Les classes critiques des scénarii d'un emballement thermique

Stoessel (2021) classe la criticité des scénarii potentiels des réactions présentant un risque thermique suivant la position des quatre températures suivantes (Alcantara, 2024; Berdouzi, 2017; Demissy et al., 2005; Giovannini et al., 2000; Kummer et al., 2020; Kummer et Varga, 2021; Laurent, 2011; Stoessel, 2021) :

1-La température du procédé T_p : la température initiale à laquelle la perte de refroidissement se produit.

2-La température maximale de la réaction de synthèse MTSR : cette température est essentiellement fonction du degré d'accumulation des réactifs non convertis.

3-Température T_{D24} : c'est la température à laquelle la valeur du temps nécessaire pour atteindre la vitesse maximum en conditions adiabatiques (Time to Maximum Rate adiabatic) : le tmr_{ad} est égal à 24 h. Il s'agit de la température la plus élevée à laquelle la stabilité thermique de la masse réactionnelle ne pose aucun problème.

4-La température maximale tolérable pour des raisons techniques MTT (Maximum Temperature for Technical reasons), c'est la plus haute température qu'un réacteur peut supporter en raison des limitations physiques du système : c'est le point d'ébullition de la masse réactionnelle dans un système ouvert et dans un système fermé, c'est la température à laquelle la pression atteint sa valeur maximale tolérable , c'est-à-dire la pression de consigne d'une soupape de sécurité ou d'un disque de rupture. Il peut également s'agir d'une limitation de température définie par le concepteur de l'équipement.

Ces quatre niveaux de température, selon leur position relative, permettent de classer les scénarios en cinq catégories distinctes, allant du moins critique (catégories 1-2) au plus critique (catégories 3-5). Chaque catégorie correspond à un type de comportement spécifique observé après une panne de refroidissement comme illustré à la figure I-4

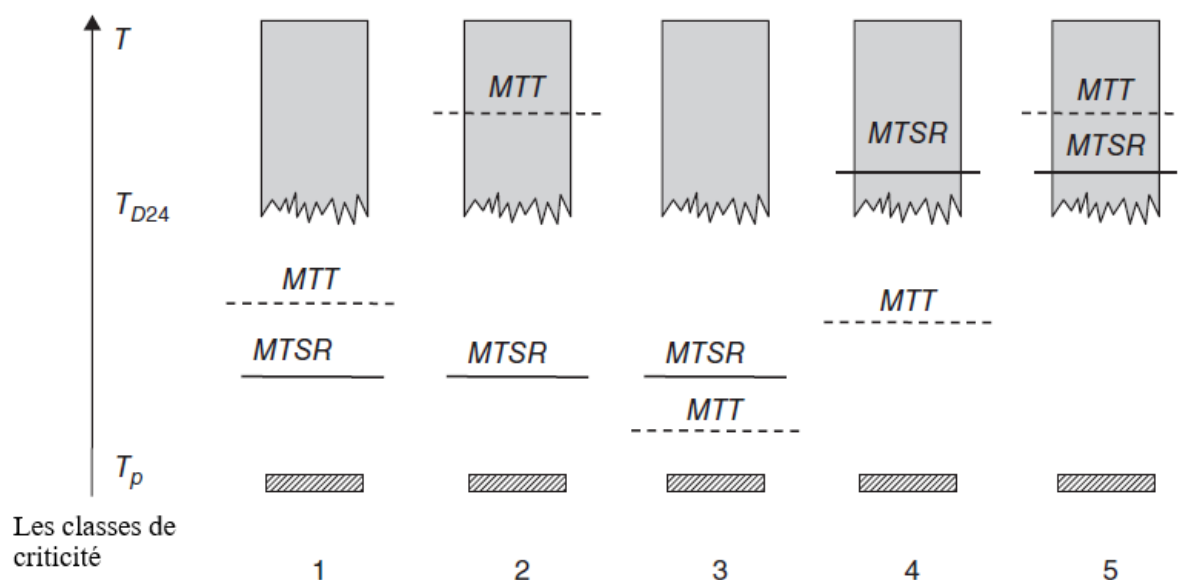


Figure I-4 : Les classes de criticité du scénario d'emballement thermique obtenues en combinant les quatre niveaux de température

La description des classes de criticité est la suivante :

Classe 1 : Après la perte de contrôle de la réaction de synthèse, la limite technique ($MTSR < MTT$) ne peut être atteinte et la réaction de décomposition n'est pas critique, car le MTSR reste inférieur à T_{D24} . Ce n'est que si la masse réactionnelle est maintenue longtemps sous des conditions de confinement thermique que le MTT peut être atteint. Le refroidissement par évaporation peut alors servir de barrière de sécurité supplémentaire. Le processus présente un faible risque thermique. Par conséquent, aucune mesure particulière n'est requise pour ce type de scénario.

Classe 2 : Après la perte de contrôle de la réaction de synthèse, la limite technique ne peut être atteinte ($MTSR < MTT$) et la réaction de décomposition n'est pas critique ($MTSR < T_{D24}$). La situation est similaire à celle de la classe 1. Cependant, du fait que le niveau du MTT est supérieur à T_{D24} , si la masse réactionnelle est maintenue plus longtemps (au-delà 24 h) dans des conditions d'accumulation de chaleur, une réaction de décomposition pourrait être initiée et

ainsi atteindre le MTT. Ceci représente un danger potentiel si le taux de dégagement de chaleur au MTT est trop élevé. Tant que la masse réactionnelle n'est pas maintenue plus longtemps dans des conditions d'accumulation de chaleur, le processus présente un faible risque thermique.

Classe 3 : En cas de perte de contrôle de la réaction de synthèse, la limite technique ($MTSR > MTT$) est atteinte, mais la réaction de décomposition ne peut être initiée ($MTSR < TD_{24}$). Dans cette situation, la sécurité du processus dépend principalement du taux de dégagement de chaleur de la réaction de synthèse au niveau de la limite technique (MTT). La première mesure de prévention consiste à recourir au refroidissement par évaporation.

Classe 4 : Après la perte de contrôle de la réaction de synthèse, la limite technique ($MTSR > MTT$) est atteinte, et la réaction de décomposition pourrait théoriquement être déclenchée ($MTSR > TD_{24}$). Dans cette situation, la sécurité du procédé dépend à la fois du taux de dégagement de la chaleur de réaction de synthèse et de celui de la réaction de décomposition, au niveau de la limite technique MTT. Le refroidissement par évaporation dans un système ouvert, ainsi que la décompression dans un système fermé, peuvent servir de barrière de sécurité. Ce scénario est similaire à celui de la classe 3, à une différence importante notable : si les mesures techniques échouent, la réaction secondaire sera déclenchée.

Classe 5 : Après la perte de contrôle de la réaction de synthèse, la réaction de décomposition est déclenchée ($MTSR > TD_{24}$), et la limite technique est atteinte pendant l'emballement de cette réaction secondaire. Dans ce cas, le refroidissement par évaporation ne peut plus servir de barrière de sécurité. La puissance calorifique de la réaction de décomposition à la limite technique détermine la sécurité thermique du procédé.

En résumé, les classes de criticité permettent de :

- comprendre le comportement thermique des réactions et des substances ;
- collecter et interpréter les données thermiques ;
- choisir une stratégie de protection contre les emballements ;
- concevoir de manière préliminaire des mesures de protection ;

Ainsi, les classes de criticité sont particulièrement utiles lors de l'analyse des risques pour le traitement des scénarios d'emballements.

En conclusion,

- les classes 1 et 2 ne nécessitent aucune mesure de sécurité spécifique.
- Les classes 3 et 4 représentent un danger lié au dégagement thermique de la réaction de synthèse, auquel s'ajoute, dans la classe 4, la chaleur dégagée par la réaction de décomposition. Pour ces deux classes, la mise en place de barrières de sécurité est indispensable.
- La classe 5 est la plus critique : elle impose une révision complète de la conception du procédé ainsi que la mise en œuvre de mesures de sécurité renforcées.

I-5- Les conséquences de l'emballement thermique

L'emballement thermique constitue l'une des conséquences les plus critiques pouvant survenir dans une enceinte fermée. Il résulte généralement d'une perte de contrôle d'une réaction chimique, qui bascule d'un régime normal vers un régime incontrôlé en raison d'une élévation non maîtrisée de la température. Dans certains cas, cette augmentation reste modérée et n'engendre pas d'effets secondaires.

Cependant, lorsque l'emballement atteint un seuil critique, il peut évoluer vers :

- une explosion thermique, phénomène marqué par la libération soudaine d'une grande quantité d'énergie. Cette explosion s'accompagne fréquemment d'émissions massives de gaz inflammables ou toxiques. L'augmentation rapide de la pression due à la compression de ces gaz peut provoquer l'éclatement du réacteur, la destruction des installations industrielles, ainsi qu'une dispersion importante de substances dangereuses. Les conséquences peuvent alors être graves, touchant à la fois l'environnement, les travailleurs et les populations environnantes.

-l'apparition de réactions secondaires : des réactions imprévues peuvent se produire, compliquant la situation.

-l'augmentation de la pression totale : Cette montée en pression peut aboutir à une explosion thermique, entraînant l'éclatement de l'enceinte, ce scénario présente des risques majeurs, tels que la libération brutale d'une grande quantité d'énergie et l'émission de gaz toxiques ou inflammables. Les effets de souffle, ainsi que les impacts mécaniques et thermiques, peuvent provoquer des effets dominos, affectant d'autres sites industriels. Liu et al, ont résumé les conséquences de l'emballement thermique par un organigramme présenté en figure I-5 (Liu et al., 2018).

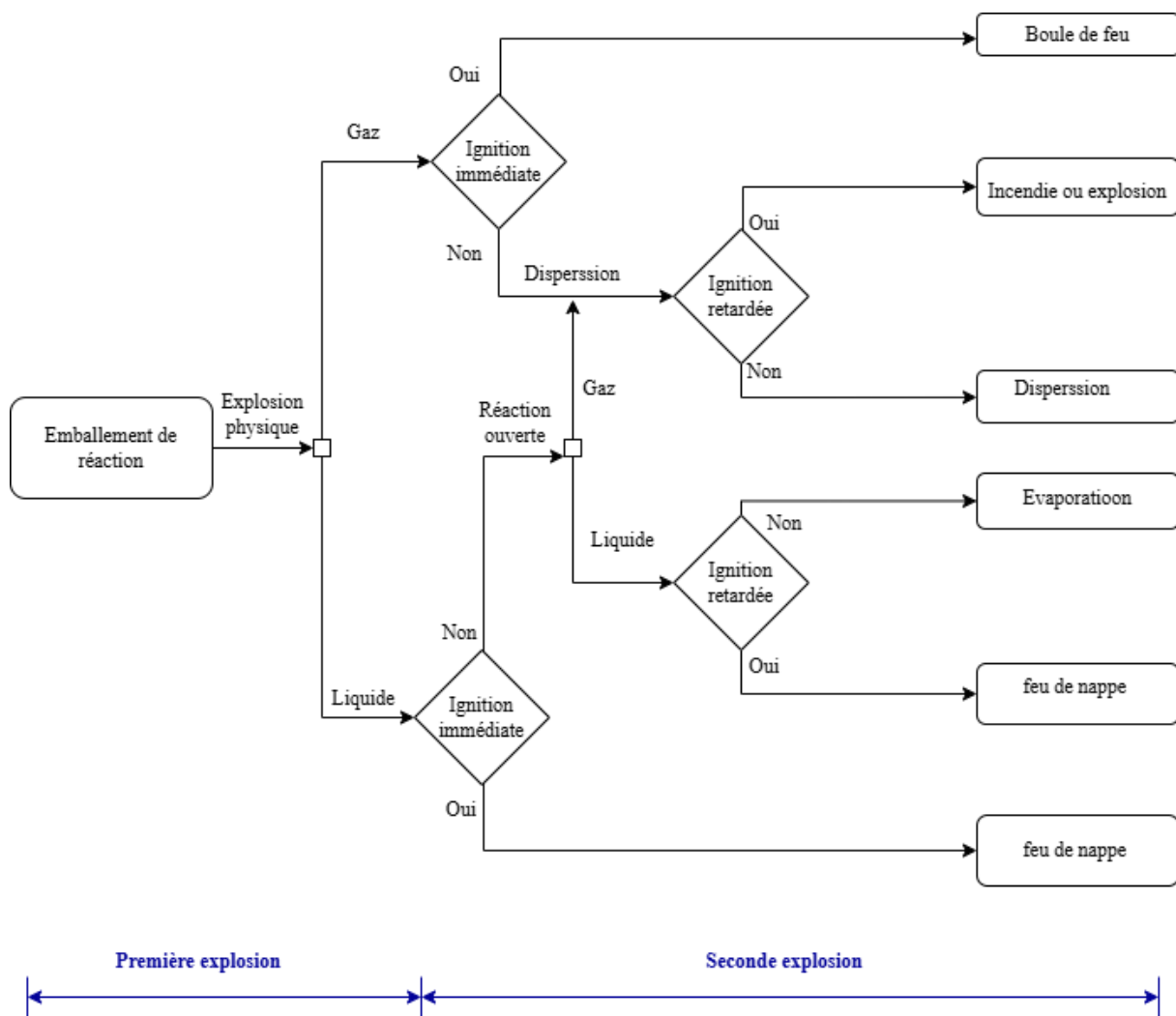


Figure I-5 : Organigramme des conséquences d'un emballement thermique (Liu et al., 2018)

Liu et al. Dans leur article intitulé « Consequence analysis of derivative accidents due to reaction runaway » (en français, « Analyse des conséquences des accidents dérivés dus à l'emballement de réaction »), se sont particulièrement intéressés aux rejets de gaz toxiques et de liquides dangereux, ainsi que leurs impacts potentiels sur la population, l'environnement et les sites industriels voisins. Leur analyse met l'accent sur les effets directs de ces substances dangereuses. En revanche, les dommages liés aux projectiles générés par l'explosion physique ont été étudiés par Mebarki et al. (2008) ainsi que Hemmatian et al. (2014), travaux cités dans Liu et al, (2018) et Dakkoun (2019).

La figure I-5 illustre l'organigramme des accidents dérivés liés à l'emballement d'une réaction chimique. Dans un réacteur fermé, l'élévation rapide de la pression interne, causée par la formation de vapeurs ou de gaz non condensables issus de la décomposition des matériaux à

haute température. Si la décharge de pression ne peut être assurée à temps, une surpression survient, entraînant l'éclatement du réacteur et la libération massive de matières inflammables, toxiques ou dangereuses. Cet événement correspond à une première explosion dite explosion physique par surpression.

Les scénarios qui suivent dépendent de l'inflammation éventuelle des phases gazeuses et liquides libérées :

Phase gazeuse :

- Si le mélange gazeux est enflammé immédiatement, une boule de feu (Fireball) se forme.
- S'il ne s'enflamme pas immédiatement, le nuage se propage autour du réacteur, se diffuse et se dilue. Selon les conditions, cela peut conduire soit à l'explosion d'un nuage de vapeur (VCE, Vapor Cloud Explosion), soit à la formation d'un nuage toxique.

Phase liquide :

- Si elle s'enflamme dès son rejet, un feu de nappe apparaît.
- Si elle ne s'enflamme pas, la phase liquide résiduelle peut continuer à s'évaporer et alimenter la réaction, libérant de nouveaux gaz qui se combinent avec ceux issus de la première explosion. Ce mélange peut, à terme, atteindre ses limites d'explosivité et déclencher un feu éclair ou un VCE.

Le VCE produira de violentes ondes de choc, souvent plus destructrices que l'incendie initial. Il est généralement considéré comme une seconde explosion. Si, au contraire, les gaz libérés ne s'enflamment pas, ils se dispersent et forment une large zone toxique, représentant un risque majeur pour les travailleurs et les populations voisines. Enfin, si la phase liquide résiduelle est enflammée, elle donnera un feu de nappe. Sinon, en cas de persistance de la phase liquide résiduelle sans inflammation immédiate, celle-ci s'évaporer progressivement dans l'atmosphère créant un risque différé d'inhalation ou d'ignition.

I-6- Causes de l’emballement thermique

Les causes de l’emballement thermique sont multiples et variées, allant de facteurs isolés à des combinaisons synergetiques de plusieurs variables. Des chercheurs du monde entier ont tenté de comprendre ces causes en analysant les retours d’expérience issus de nombreux accidents survenus dans leurs pays respectifs. Parmi les pionniers de cette démarche figurent Barton et Nolan, au Royaume-Uni, qui ont étudié 189 cas sur la période 1962-1987. Leur revue met en lumière les causes fondamentales du déclenchement de l’emballement thermique dans les réacteurs chimiques. Parmi les facteurs les plus fréquents déclenchant ce phénomène figurent notamment (Barton et Nolan, 1989; Nolan et Barton, 1987) :

- 1- Un manque fondamental de compréhension adéquate de la chimie du procédé et de la thermochimie ;
- 2- Une conception technique inadéquate pour le transfert de chaleur ;
- 3- Des systèmes de contrôle et de sécurité de secours insuffisants ;
- 4- Des procédures opérationnelles inadéquates, y compris la formation des opérateurs ;

Les lecteurs souhaitant approfondir le détail des causes pourront se référer à la revue de Barton et Nolan, (1989).

Ces facteurs constituent une base empirique essentielle pour comprendre les mécanismes à l’origine de l’emballement thermique. Ils permettent également d’élaborer une stratégie de prévention plus efficace et spécifiquement adaptée, afin de se prémunir contre ce type d’accident.

Une étude récente menée par (Alcantara et al, 2024) confirme la cohérence des causes identifiées dans la littérature scientifique, en les confrontant aux résultats obtenus par plusieurs chercheurs tels que (Sales et al, 2007) ; (Maniar, Kumar et Mentzer, 2020) ; (Wakakura et Liduka , 2021) ; (Saada et al., 2015) ; (Cheng, Duh et Chen, 1998) ; (Zhang, 2021) ; (Dakkoune et al., 2019) ; ainsi que (Balasubramanian et Louvar, 2002). Cette convergence des données, issue de différentes approches méthodologiques et contextes d’étude, renforce la validité des facteurs explicatifs retenus pour comprendre les mécanismes complexes à l’origine de l’emballement thermique. Par ailleurs, ces travaux orientent la conception de stratégies de prévention mieux ciblées et adaptées aux spécificités du phénomène. À cet égard, la figure I-6 présente une cartographie des pays où le taux d’accidents d’emballement thermique est le plus élevé, soulignant ainsi les zones géographiques prioritaires pour la mise en œuvre de mesures préventives.

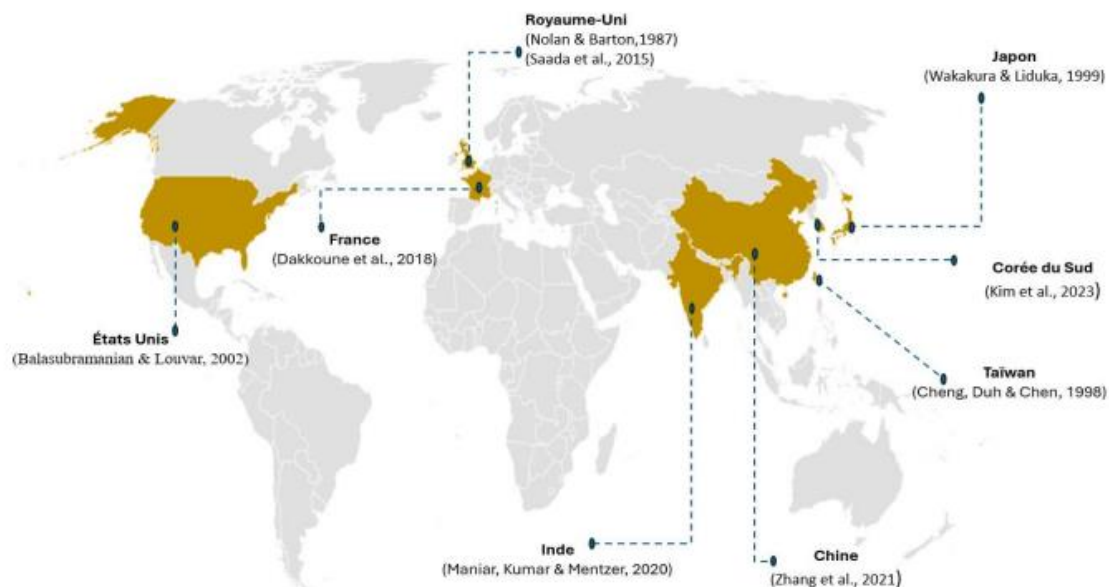


Figure I-6 Carte du monde avec les pays ayant le taux d'accidents et d'emballage thermique le plus élevé comme origine (Alcantara, 2024)

I-7- Accidentologie

1-7-1- Accidentologie dans le monde

L'étude des retours d'expérience montre que les réactions les plus fréquemment impliquées dans le phénomène de l'emballage thermique sont des réactions chimiques exothermiques, le tableau 2 recense ces types de réactions (Giovannini et al., 2000; Laurent, 2011).

Depuis le début du XXe siècle, l'avènement de la révolution industrielle a profondément transformé les conditions de vie quotidienne, en améliorant le confort et en facilitant le développement économique. Cependant, cette évolution a également introduit de nouveaux risques, notamment liés à la proximité croissante des sites industriels avec les zones urbaines, ce qui accroît la vulnérabilité des populations face aux accidents majeurs.

À titre d'exemple, l'explosion survenue le 1er juin 1974 à l'usine chimique de Flixborough, au Royaume-Uni, illustre parfaitement ces dangers. L'explosion de 50 tonnes de cyclohexane a causé la mort de 28 employés, de nombreux blessés, ainsi que d'importants dégâts pour la population avoisinante. Deux ans plus tard, un autre désastre s'est produit à Seveso, en Italie, le 10 juillet 1976. Le disque de rupture d'un réacteur a éclaté suite à une montée en température

et en pression résultant d'une réaction secondaire exothermique. Cet incident a provoqué le rejet massif de dioxines dans l'atmosphère, entraînant de graves dommages environnementaux, Au total, 736 personnes furent évacuées et 193 ont nécessité un suivi médical. Bien que cette catastrophe n'ait pas provoqué de morts directes, elle a fortement contribué à l'évolution de la réglementation européenne.

Le 3 décembre 1984, l'Inde a connu un drame sans précédent à Bhopal, avec la fuite de 40 tonnes de gaz toxiques dans une usine de fabrication de pesticides. Cet accident a causé au moins 10 000 décès, et plus d'un demi-million d'habitants furent affectés, ce qui en fait la plus grande catastrophe chimique de l'histoire. La même année, le 19 novembre 1984, un violent incendie suivi d'explosions a frappé une zone de stockage de gaz de pétrole liquéfié (GPL) à San Juan Ixchuatepec, au Mexique. La zone a été totalement détruite, avec un bilan de 500 morts, 7 000 blessés et 39 000 personnes évacuées. Le 21 septembre 2001 à l'usine AZF de Toulouse, l'explosion de 300 tonnes de nitrate d'ammonium a détruit l'installation, faisant 31 morts, 2500 blessés et des dégâts matériels considérables (Alcantara, 2024; Benaissa, 2006; Berdouzi, 2017; Dakkoune, 2019; Hernandez, 2020; Margossian, 2006).

L'Algérie a connu plusieurs catastrophes industrielles graves, parmi lesquelles des accidents liés à des phénomènes d'emballement thermique et d'explosions dans des sites chimiques et pétrochimiques. Le plus notable est l'accident de Skikda survenu le 19 janvier 2004. Une explosion, provoquée par une déflagration dans une chaudière à haute pression de l'unité GNL3 (Chettouh et al., 2016) a entraîné :

- La mort de 27 ouvriers et 74 blessés
- La destruction de la moitié du complexe de gaz naturel liquéfié : 3 des 6 unités de GNL.
- De lourds dégâts matériels estimés à environ 800 millions de dollars.
- Des débris sont projetés jusqu'à 250 m du point de l'explosion mais les dégâts restent limités au site.

Le tableau I-2 illustre une chronologie des principales catastrophes chimiques majeures enregistrées depuis le début du siècle dernier.

Tableau I-2 Les principales catastrophes chimiques majeures dans le monde.

Date	Lieu	Nature	Conséquences
16 novembre 1936	Saint Chamais, France	Explosion d'un réservoir de TNT due à une réaction instable	53 morts et 100 blessés
16 avril 1947	Texas City (États-Unis)	Feu - explosion	Plusieurs centaines de blessés
4 janvier 1966	Feyzin	Fuite-explosion (raffinerie)	18 morts, 84 blessés, des dommages enregistrés dans un rayon de 16 km
20 janvier 1968	Rotterdam (Pays-Bas)	Explosion (raffinerie)	2 morts, plus de 3000 blessés entre les travailleurs et les citoyens, des dommages enregistrés dans un rayon de 5 Km
30 janvier 1972	Mazingarbe (Pas-de-Calais, France)	Explosion (usine chimique)	Des dégâts aux habitations jusqu'à 2 km
1 juin 1974	Flixborough (Angleterre)	Fuite – explosion (usine chimique)	28 morts, 89 blessés, 3000 personnes évacuées, des dommages enregistrés dans un rayon de 13 km
10 juillet 1976	Seveso (Italie)	Fuite de gaz (usine chimique)	1800 ha contaminés, 736 personnes évacuées, grandes incertitudes sur les conséquences du poison et l'étendue des risques
11 juillet 1978	Los Alfaques (Espagne)	Explosion (transport de gaz liquéfié)	216 morts, 200 blessés (accident près d'un camping)
28 mars 1979	Three Mile Island (U.S.A)	Défaillance d'un réacteur (centre nucléaire)	Incertitude technique, confusion des responsables politiques, 200 000 personnes évacuées
19 novembre 1984	Mexico (Mexique)	Explosion – feu dans un dépôt de GPL	Plus de 500 morts, 1200 disparus, 7000 blessés, 200 000 personnes évacuées, projection de missiles à 200 m
3 décembre 1984	Bhopal (Inde)	Explosion d'un bac de stockage. Libération de 40 tonnes de gaz toxiques dans une installation de pesticides	Au moins 10 000 morts et plus d'un demi-million d'habitants ont été affectés.
26 avril 1986	Tchernobyl (URSS)	Explosion d'un réacteur nucléaire	Nuage radioactif sur toute l'Europe Centrale nucléaire 135000 personnes évacuées, 2800 km ² de terrain condamnés, estimation de 40 000 décès pouvant se déclarer dans les prochaines décennies

Tableau I-2 Les principales catastrophes chimiques dans le monde (suite)

9 novembre 1992	La Mède (France)	Très violente explosion dans une raffinerie suivie d'un incendie dus à une fuite de gaz	6 morts et des dégâts matériels graves
21 septembre 2001	Toulouse (France)	Explosion d'un stock de 300 tonnes de nitrate d'ammonium	31 morts, 2500 blessés et lourd dégâts matériels
17 novembre 2003	Arzew (Oran, Algérie)	Explosion (complexe pétrochimique)	
19 janvier 2004	Skikda (Algérie)	Explosion (raffinerie)	27 morts, 74 blessés parmi les travailleurs. Des dommages enregistrés dans un rayon de 4 km
13 novembre 2005	Chine	Explosion usine chimique Kharbine	5 morts, 70 blessés, 1 disparu et des dégâts matériels
23 mars 2005	Texas City (U.S.A)	Explosion dans une raffinerie	5 morts et plus 180 blessés
17 septembre 2006	Gassi-Touil (sud-est d'Ouargla) (Algérie)	Explosion sur un puits en cours de forage	5 blessés et deux ouvriers disparus
2 juillet 2019	Arzew	Explosion au niveau d'une unité pétrochimique	4 blessés
11 octobre 2021	Arzew	Explosion dans le complexe Fertial	Des dégâts matériels

I-7-2-Les principales réactions ayant été impliquées dans des accidents recensés

Selon les travaux de (Giovannini et al., 2000; Laurent, 2011; Vince, 2000), une étude menée par MADDISON et ROGERS a recensé 189 accidents sur la période de 1962 à 1984. Ces chercheurs ont identifiés les réactions chimiques à l'origine de ces accidents. Le tableau 1-3 et la figure I-7 montrent que les réactions de polymérisations sont les plus grands responsables des emballements thermiques, ces réactions sont connues pour être très exothermiques.

Tableau I-3 Les principales réactions chimiques impliquant un emballage thermique

Type de réaction	Pourcentage d'accidents recensés
Polymérisations	34%
Nitration	8%
Sulfonation	7%
Réactions d'hydrolyse	5%
Salifications (formations de sels)	4%
Halogénations (chlorations, bromations)	4%
Alkylations	3%
Aminations	2%
Diazotations	2%
Réactions d'oxydation	1%
Estérifications	0.5%
Autres	29.5%

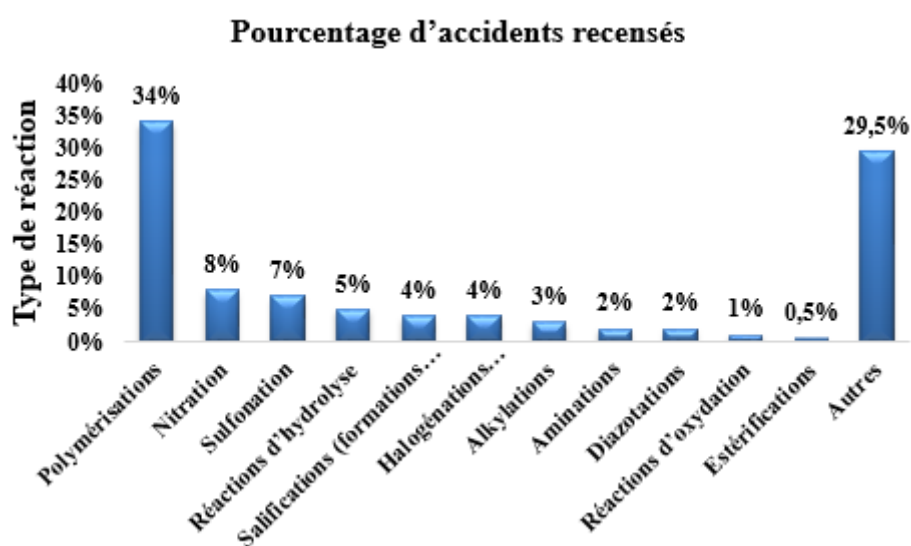


Figure I-7 Emballage thermique par type de réaction

1-7-3- L'accidentologie en Algérie

L'Algérie compte environ 4000 installations industrielles situées en milieu urbain. Historiquement, Cette concentration s'explique par l'implémentation des entreprises industrielles à proximité des zones urbaines durant la période coloniale. Cette localisation

stratégique était dictée par la disponibilité des infrastructures, la proximité des marchés et l'accès à une main-d'œuvre abondante. Aujourd'hui, ces sites représentent le cœur du tissu industriel national et concentrent une part importante de l'activité économique et de l'emploi. Toutefois, ils constituent également une source de risques pour la population et l'environnement (Mohamed-Chérif et Chacha, 2015).

Depuis son indépendance en 1962, l'Algérie a fondé une grande partie de son développement économique sur l'exploitation de ses vastes ressources minières, notamment les hydrocarbures, qui demeurent la principale richesse naturelle du pays. Les exportations de pétrole et de gaz représentent à elles seules 98% des recettes en devise. Découvert dans les années 1950, le pétrole algérien représente environ 0,9 % des réserves mondiales. En outre, près de 70 % du gaz naturel est exporté sous forme liquéfiée, principalement à partir des pôles pétrochimiques d'Arzew et de Skikda (U.S.Energy Information Administration.Algeria, 2013).

L'industrie algérienne repose principalement sur le raffinage du pétrole et du gaz. On compte six raffineries en Algérie, dont cinq sont actuellement en activité : Alger, Oran (Arzew), Skikda, Hassi-Messaoud et Adrar. La raffinerie d'In-Amenas, quant à elle, est à l'arrêt depuis 1986 (Chettouh, 2021). Le tableau I-4 détaille les principales caractéristiques de ces raffineries. Tandis que la figure I-9 illustre la carte énergétique nationale, la figure I-10 localise les raffineries et des entrepôts de stockage des carburants (Ministère des hydrocarbures et des mines).

Les travaux de Chettouh et Hamzi (2013, 2014, 2015, 2016, 2018), ainsi que l'étude de Chettouh (2021) ont porté sur l'analyse statistique des accidents survenus entre 2003 et 2018 dans les pôles pétrochimiques d'Arzew et de Skikda. Au total, 59 accidents ont été recensés, parmi lesquels trois se distinguent par leur gravité : Les plus graves sont ceux du 19 janvier 2004 et du 5 octobre 2005 à Skikda et d'Arzew le 9 novembre 2007.

- Skikda, le 19 janvier 2004, une forte déflagration suivie d'un incendie au complexe de liquéfaction de gaz naturel (GNL) provoque la destruction partielle des installations. Le bilan humain est lourd : 27 morts et 74 blessés. L'origine de l'accident est attribuée à une déflagration dans la chaudière de l'unité 40, consécutive à une fuite de gaz (Chettouh et Hamzi, 2013) ; (Aria, n°34130)

- Skikda, le 5 octobre 2005, une explosion suivie d'un incendie se déclare sur un bac de stockage de pétrole contenant 35 000 m³ de pétrole brut. L'incendie se propage à un bac adjacent par effet domino, générant un immense nuage noirâtre de plus de 200 m de hauteur au-dessus de la plateforme pétrochimique et de la ville voisine. Le système d'extinction automatique des bacs ne fonctionne pas, Le bilan humain est de 2 morts et 7 blessés. Les pertes financières sont évaluées entre 5 et 6 millions de dollars (Chettouh et Hamzi, 2013) ; (Aria, n° 34130).
- Arzew, le 9 novembre 2007, une fuite de gaz de méthanol dans un dépôt de stockage entraîne une explosion suivie d'un incendie des câbles électriques. L'accident cause 7 blessés (Chettouh et Hamzi, 2015) ; (Aria, n° 33825).

L'analyse statistique réalisée par Chettouh et Hamzi (2018) montre que

- les incendies constituaient la catégorie d'accident la plus fréquente, représentant 30 cas sur 59, soit environ 50 %.
- Les défaillances matérielles (pannes d'équipements) sont la principale cause des accidents, avec 18 cas sur 59 (33 %),
- les fuites de produits représentent 12 cas sur 59 (21 %).
- Parmi les autres causes, on note : les étincelles (13 %), les flammes (10 %) et les facteurs environnementaux, tels que les hautes températures, la foudre ou les inondations (4 %).
- L'erreur humaine a joué un rôle marginal, avec seulement 2 %.
- La catégorie « Inconnue », regroupant les causes non identifiées, atteint 17 % (voir figure I-8). .

Ces accidents ont eu des conséquences importantes sur le plan humain, environnemental et économique.

Plus récemment, un incident est survenu le dimanche 9 octobre 2021 au sein du complexe FERTIAL d'Arzew, spécialisé dans la production d'engrais et de fertilisants. L'explosion, provoquée par une fuite d'hydrogène, n'a causé aucune victime, mais a entraîné de légers dégâts matériels, (Algérie Presse Service, 10 octobre 2021)

Tableau I-4 Les zones pétrochimiques de l’Algérie

N°	Nom	Date de création	Situation géographique	Accidentologie 2003-2018
1	Alger (raffinerie de pétrole)	1964	Sidi R'cine à l'est d'Alger	Aucune Statistique (AS)
2	Arzew (raffinerie de pétrole et de gaz naturel)	1972	40km d'Oran	10 selon (Chettouh et Hamzi, 2018)
3	Hassi-Messaoud (raffinerie de pétrole)	1972	Hassi-Messaoud	AS
4	-Skikda (raffinerie de pétrole RA1K et de gaz naturel) -Topping condensat à Skikda (raffinerie de pétrole)	-1980 -2008	Skikda	59 selon (Chettouh et Hamzi, 2018)
5	Adrar (raffinerie de pétrole)	2007	Sebaa à 50 km d'Adrar	AS
6	In-Amnas (raffinerie de gaz naturel)	A l'arrêt depuis 1986	Tiguentourine, à 40km kilomètres d'In-Amnas	AS

Chettouh et Hamzi ont montré que la majorité des accidents industriels en Algérie se sont produits entre 2011 et 2018, ce qui suggère que la défaillance des équipements, liée principalement au vieillissement des installations, constitue la cause dominante. Cette observation rejoint les conclusions de (Khan and Abbasi, 1999; Konstandinidou et al., 2006; Mihailidou et al., 2012).

En revanche, des études menées en France par (Dakkoune et al, 2019) et en Grèce par (Konstandinidou et al, 2005) indiquent que plus de 40 % des accidents sont dus à l'erreur humaine. Cette divergence souligne l'influence du contexte industriel et réglementaire : en Algérie, la vétusté des équipements demeure le facteur prédominant, tandis que dans les pays européens, où la maintenance et les normes de sécurité sont plus développées, les facteurs humains apparaissent plus déterminants.

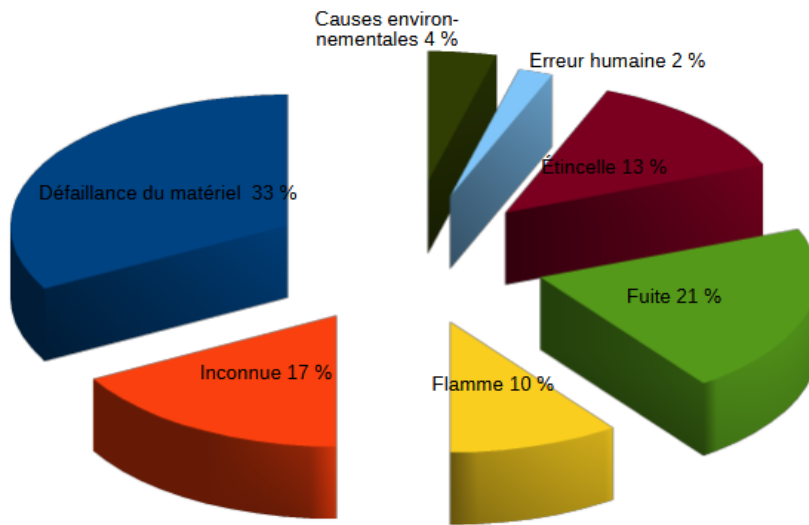
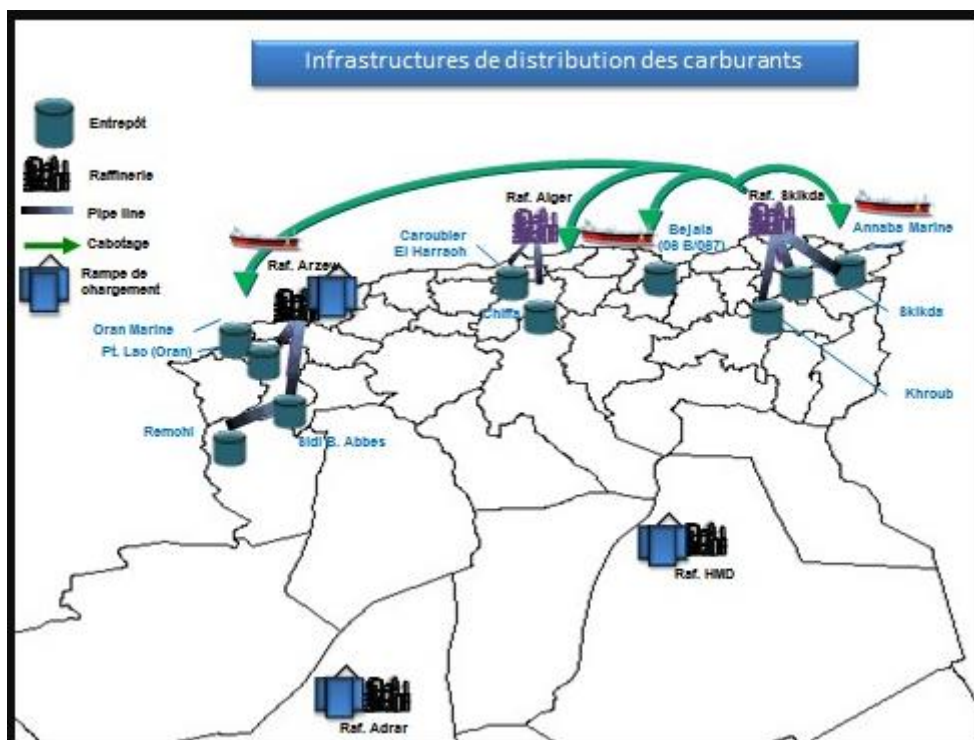


Figure I-8 Les causes des accidents des raffineries de Skikda et Arzew



Figure I-9 La carte de répartition des gisements de pétrole (vert) et de gaz (rouge) ainsi que les réseaux de transport les reliant aux terminaux situés au nord de l'Algérie (Ministère des hydrocarbures et des mines, 2024)



La figure I-10 La carte de localisation des principales raffineries et des zones d'entreposage.
(Ministère des hydrocarbures et des mines, 2024)

Note

Il est important de souligner que l'ensemble des statistiques d'accidents industriels disponibles pour l'Algérie concernent principalement le secteur pétrochimique, tandis qu'aucune donnée spécifique n'a pu être identifiée pour le secteur de la chimie non pétrochimique. Cette situation semble indiquer une lacune significative dans la collecte et la diffusion des informations relatives aux accidents dans ce secteur, ce qui limite la compréhension globale des risques industriels en Algérie.

Les études recensent essentiellement les accidents liés aux installations pétrochimiques, notamment des sites à haut risque comme la raffinerie et le complexe pétrochimique de Skikda. En revanche, les accidents survenus dans les industries de chimie classiques ne font pas l'objet d'une documentation accessible à ce jour, ce qui pourrait freiner l'élaboration de mesures préventives adaptées à ce secteur.

Dans son article (Chettouh , 2021). Il est indiqué que les principaux accidents sont les incendies et les explosions, qui représentent 69,49 % des cas. Cependant, elle ne précise pas leur origine : s'agit-il des conséquences d'un emballement thermique, comme le suggèrent (Liu

et al., 2018), ou de causes directes liées simplement à l'accumulation de produits inflammables ?

À titre d'exemple, dans le cas de l'usine FERTIAL, un complexe industriel dédié à la production de fertilisants et d'engrais, doté notamment d'un réacteur, aucune information précise n'a été communiquée concernant la source exacte de l'explosion survenue.

I-8- Réglementation

Le XXe siècle a été marqué par la naissance de l'industrie, son essor rapide, mais également par de nombreuses catastrophes industrielles, en particulier dans le secteur des procédés chimiques. Ces événements dramatiques, tels que les accidents de Bhopal et de Seveso, ont profondément marqué la mémoire collective. Ils ont terni l'image de l'industrie chimique et pétrochimique en révélant à quel point les accidents dans ces domaines peuvent être dévastateurs, tant sur le plan humain, environnemental que matériel, avec des conséquences pouvant affecter les générations futures.

Paradoxalement, ces catastrophes ont aussi été à l'origine de la naissance d'une véritable science du risque et de la sécurité industrielle. Elles ont conduit à l'élaboration de réglementations strictes, telles que les directives **Seveso I, II et III**, destinées à prévenir les accidents majeurs et à protéger la population et l'environnement.

I-8-1- La législation européenne

Le 10 juillet 1976, un grave accident industriel s'est produit dans la commune italienne de Meda, près de la petite ville de Seveso, en Lombardie. Cet accident a eu lieu dans l'usine chimique ICMESA, propriété du groupe pharmaceutique suisse Hoffmann-La Roche, spécialisée dans la fabrication d'herbicides. Une défaillance technique dans un réacteur a provoqué une fuite importante d'un nuage toxique rougeâtre contenant de la dioxine TCDD, un composé chimique extrêmement dangereux. Ce nuage toxique s'est rapidement propagé dans la région environnante, contaminant une vaste zone autour de Seveso et d'autres communes proches (Alcantara, 2024; Berdouzi, 2017; Dakkoune, 2019).

Les conséquences ont été dramatiques : plusieurs centaines de personnes ont été intoxiquées, plus de 3 300 animaux domestiques sont morts, et environ 80 000 têtes de bétail ont été abattues pour empêcher la propagation de la contamination. Les sols et les habitations

ont dû faire l'objet de lourds travaux de décontamination, qui ont duré plusieurs années. Cet accident a eu un fort retentissement en Europe, conduisant notamment à la création de la directive dite « Seveso » pour améliorer la prévention des risques industriels majeurs (Alcantara, 2024; Berdouzi, 2017; Dakkoune, 2019).

La directive européenne dite « Seveso I », adoptée le 24 juin 1982, vise principalement à demander aux États membres et aux industriels d'identifier les risques liés à leurs activités industrielles dangereuses et à mettre en place des mesures pour prévenir les accidents majeurs et en limiter les conséquences pour les personnes et l'environnement. Cette première directive impose notamment aux exploitants d'établissements industriels utilisant ou stockant des substances dangereuses d'établir des études de dangers, des plans d'urgence, ainsi que d'informer les populations riveraines. Elle fixe ainsi un cadre réglementaire européen pour la prévention des risques technologiques majeurs hérité de l'accident de Seveso en 1976 (Alcantara, 2024; Berdouzi, 2017; Dakkoune, 2019; Deloffre, 2001).

La directive Seveso II, adoptée en 1996, remplace la directive Seveso I et la complète en introduisant la notion de prévention des accidents majeurs. Elle classe les installations Seveso en deux catégories : seuil haut et seuil bas. Ces deux types d'installations font l'objet d'une étude de danger et d'une enquête publique. La directive s'applique aux établissements impliqués dans la fabrication, le stockage, l'emploi, le transfert, le transport, le chargement ou le déchargement de produits chimiques dangereux. Le classement d'un établissement dépend de la présence, en quantités supérieures aux seuils fixés dans les annexes de la directive, de substances dangereuses. Le dépassement de ces seuils est déterminé selon une règle de cumul qui prend en compte la somme pondérée des quantités de substances présentes, ce qui détermine si l'établissement est soumis à la directive ou non.

La directive prend aussi en compte les effets domino résultant de la proximité entre établissements industriels voisins. Elle impose aux exploitants la mise en place d'un système de management de la sécurité (SMS) adapté aux risques identifiés. Par ailleurs, des plans d'urgence interne et externe doivent être testés régulièrement. Les États membres doivent également organiser un système d'inspection des établissements soumis à la directive.

Enfin, la directive encadre l'urbanisation autour des sites industriels en imposant des distances d'éloignement entre les installations et les riverains, ainsi que, le cas échéant, des mesures techniques complémentaires à réaliser par l'exploitant. Cette réglementation vise ainsi

à renforcer la prévention des risques majeurs associés aux substances dangereuses et à limiter les conséquences des accidents industriels (Deloffre, 2001; Ministère de l'écologie, du Développement durable et de l'énergie, Commission européenne, Code de l'environnement)

En 2015 la directive Seveso III est promulguée pour renforcer les exigences déjà imposées aux industriels pour maîtriser les accidents majeurs impliquant des produits chimiques. Elle introduit des normes plus strictes en matière d'inspection et renforce l'obligation d'information du public, du personnel et des exploitants des établissements voisins du site de production, susceptibles d'être impactés en cas d'accident.

La directive Seveso III renforce et détaille les obligations des entreprises titulaires d'établissements seuils hauts et bas, dans le cadre de la mise en œuvre de leur politique de maîtrise des risques majeurs (Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie ; Commission européenne ; Code de l'environnement) :

- ✓ **Étude de danger** : cette étude est obligatoire depuis la directive Seveso I. Elle doit permettre d'identifier les sources de risques, les scénarios d'accidents envisageables, leurs effets potentiels sur les personnes et l'environnement ainsi que leur probabilité. Les exploitants doivent régulièrement mettre à jour cette étude pour garantir une gestion dynamique des risques.
- ✓ **Politique de prévention des accidents majeurs (PPAM)** : dispositif organisationnel obligatoire pour la prévention des accidents majeurs impliquant des substances dangereuses. Cette politique doit être intégrée à tous les niveaux de l'entreprise, y compris pour les sous-traitants et prestataires extérieurs, et s'appuie sur des actions de sensibilisation, de formation, ainsi qu'une démarche de progrès continu.
- ✓ **Plan particulier d'intervention (PPI)** : élaboré en concertation avec le préfet et le public, ce plan organise l'intervention des forces de sécurité civile pour faire face à un accident susceptible de dépasser l'enceinte de l'installation Seveso.
- ✓ **Système de gestion de la sécurité (SGS)** : réservé aux exploitants des établissements « seuil haut ». Ce système correspond à un ensemble d'actions planifiées et systématiques intégrant les mesures de la PPAM, dont le contenu est soumis à l'avis de l'inspection des installations classées et au préfet.
- ✓ **Plan d'opération interne (POI)** : obligatoire également pour les établissements « seuil haut », ce plan d'urgence élaboré par l'exploitant organise les moyens, équipements et

méthodes d'intervention pour protéger le personnel, les populations et l'environnement en cas d'accident.

- ✓ **Information du public** : Seveso III vise à renforcer la protection des citoyens et de l'environnement. Elle impose aux établissements Seveso d'assurer une transparence totale, notamment via un site internet accessible au public. Ce site doit mentionner le statut de l'établissement, les risques potentiels, les mesures de prévention mises en place et les comportements à adopter en cas d'accident. De plus, les personnes physiques ou morales peuvent exercer un recours juridique si elles estiment que leurs droits n'ont pas été pris en compte lors de l'installation d'un site Seveso à proximité de leur domicile.

1-8-2-La législation algérienne

Sont considérés comme des risques majeurs en Algérie selon l'article 10 de la loi n° 04-20 du 25 décembre 2004 relative à la prévention des risques majeurs et à la gestion des catastrophes dans le cadre du développement durable, les phénomènes suivants (*Journal officiel du 25 décembre 2004, N° 84, Art 10, P15, 2004; Peer-Review-report-Algeria, 2019*):

- ✓ les séismes et les risques géologiques,
- ✓ les inondations,
- ✓ les risques climatiques,
- ✓ les feux de forêts,
- ✓ les risques industriels et énergétiques,
- ✓ les risques radiologiques et nucléaires,
- ✓ les risques portant sur la santé humaine,
- ✓ les risques portant sur la santé animale et végétale,
- ✓ les pollutions atmosphériques, telluriques, marines ou hydriques,
- ✓ les catastrophes dues à des regroupements humains importants

En Algérie la première réglementation relative à la protection de la population et l'environnement remonte au 20 février 1976 avec l'ordonnance n° 76-4 du 20 février 1976, et son décret d'application n° 76-34 du même jour. Ces textes réglementent les établissements industriels et commerciaux présentant des risques pour la sécurité, la salubrité, la commodité du voisinage, la santé publique ou l'environnement (*Journal officiel du 12 mars 1976, N°21, Art 1, p 238*).

L'amélioration du cadre législatif algérien en matière de gestion des risques environnementaux remonte aux années quatre-vingt. Suite au séisme d'El Asnam du 10 octobre 1980, le gouvernement a promulgué la loi 83-03 du 5 février 1983 relative à la protection de l'environnement. Cette loi impose un contrôle strict des formes des pollutions générées par les installations classées, notamment dans ses articles 74 à 88. Elle soumet ces installations à une procédure d'autorisation ou de déclaration selon la gravité des dangers potentiels liés à leur exploitation. L'article 75 de la loi précise que les trois catégories d'installation soumises à autorisation dépendent de leur classification, relevant respectivement du ministère, du wali, ou du maire. En outre, cette loi impose la réalisation d'une étude d'impact environnemental détaillant les dangers que peut présenter l'installation en cas d'accident, ainsi que les mesures prévues pour en réduire la probabilité et les conséquences, accompagnée d'un plan de voisinage destiné à la gestion des risques autour du site, (*Journal officiel du 8 février 1983, N°6, Art 74-88, P258*).

Selon l'article 74 de la loi 83-03, les installations classées regroupent les usines, ateliers, chantiers, carrières, et de manière générale, toutes les installations exploitées ou détenues par des personnes physiques ou morales, publiques ou privées qui peuvent présenter des dangers ou des inconvénients pour :

- ✓ la commodité du voisinage,
- ✓ la santé,
- ✓ la sécurité,
- ✓ la salubrité publique,
- ✓ l'agriculture,
- ✓ la protection de la nature et de l'environnement,
- ✓ la conservation des sites et monuments.

Article 75 - Les installations visées à l'article 74 sont définies dans la nomenclature des installations classées, établie par décret. Ce décret soumet les installations à autorisation ou à déclaration suivant la gravité des dangers ou des inconvénients que peuvent présenter les exploitations.

Article 76 - Sont soumises à autorisation du ministre chargé de la protection de l'environnement, du wali ou du président de l'assemblée populaire communale et, selon leur importance, les installations qui présentent des dangers ou des inconvénients pour les intérêts visés à l'article 74 de la présente loi. L'autorisation n'est accordée que si ces dangers ou inconvénients sont supprimés ou empêchés par les mesures que spécifie l'arrêté pris par le ministre chargé de la

protection de l'environnement. Le décret prévu à l'article 75 fixe les catégories d'installations soumises à l'autorisation du ministre, du wali ou du président de l'assemblée populaire communale.

Article 77- Sont soumises à une déclaration adressée au président de l'assemblée populaire communale concerné, les installations qui ne présentent pas des dangers ou des inconvénients aux intérêts visés à l'article 74 ci-dessus et qui doivent néanmoins, en raison de leurs activités, respecter les prescriptions générales édictées par la réglementation en vue

Par ailleurs, le « plan national de prévention des catastrophes et d'organisation des interventions et secours » a été adopté par le gouvernement algérien le 29 mai 1985. Ce plan se concrétise par deux décrets publiés le 25 août 1985 (*Journal officiel du 29 mai 1985, N° 36, p. 833*).

- ✓ le décret n° 85-231 du 25 août 1985 relatif à l'organisation des interventions et secours en cas de catastrophe
- ✓ le décret n° 85-232 du 25 août 1985 relatif à la prévention des risques de catastrophe.

La catastrophe industrielle de Skikda en janvier 2004 a marqué un tournant significatif dans le développement du cadre juridique algérien relatif à la gestion des risques. En effet, elle a conduit au dépôt puis à la promulgation le 25 décembre 2004 de la loi n° 04-20 relative à la prévention des risques majeurs et à la gestion des catastrophes dans le cadre du développement durable. Cette loi vise notamment à organiser la prévention, la gestion des crises et la protection des populations face aux risques majeurs, qu'ils soient naturels, technologiques ou sanitaires.

Le dispositif juridique a été complété par le décret exécutif n° 19-59 du 2 février 2019, qui précise les modalités d'élaboration, de gestion et de coordination des secours en situation de catastrophe. Ce décret vient renforcer concrètement l'application des principes définis par la loi n° 04-20, notamment en expliquant les responsabilités des autorités opérationnelles pour la gestion des interventions et secours.

Ainsi, la loi n° 04-20 de 2004, accompagnée de son décret de 2019, constitue aujourd'hui le socle légal principal encadrant la politique algérienne de gestion des risques majeurs et des catastrophes, dans une optique intégrée et durable (*Journal officiel du 25 décembre 2004, Art 1-62, P14-20*).

La loi n° 04-20 du 25 décembre 2004 est une loi-cadre fondamentale pour la gestion des risques de catastrophe en Algérie. Elle couvre l'ensemble du cycle de gestion des catastrophes, incluant la prévention, la préparation (principalement sous forme de planification), la réponse ainsi que l'organisation des interventions et des secours concernant les dix risques majeurs naturels et technologiques définis par la loi.

La loi prescrit l'élaboration pour chaque type de risque majeur (sismique, inondation, industriel, etc.) d'un plan général de prévention. Ce plan fixe les règles et les procédures visant à :

- Réduire la vulnérabilité des personnes, des biens et de l'environnement,
- Prévenir l'apparition ou l'aggravation des effets des catastrophes,

Cette loi institue aussi un système global de gestion des catastrophes conduit par l'État et impliquant les institutions publiques, les collectivités territoriales, les opérateurs économiques, sociaux et scientifiques, ainsi que la société civile. Elle insiste sur la nécessité d'une coordination étroite des actions de prévention et de gestion au niveau national et local.

Pour chaque installation exposée à un ou plusieurs risques majeurs, la loi exige l'élaboration de trois types de plan :

1-Plans particuliers d'intervention (PPI)

Les plans particuliers d'intervention ont pour objet, pour chaque aléa ou pour chaque risque majeur particulier identifié et notamment en matière de pollution atmosphérique, tellurique, marine ou hydrique :

- ❖ d'analyser les risques ;
- ❖ de prévoir les dispositifs d'alerte ;
- ❖ de planifier les mesures spécifiques à mettre en œuvre pour maîtriser les accidents ;
- ❖ d'informer les riverains sur les mesures prises aux abords des installations concernées

2- Plan d'organisation interne (POI)

Le plan d'organisation interne concerne spécifiquement chaque installation (industriel, énergétique, etc.) définissant :

- ❖ l'ensemble des mesures de prévention des risques propres à l'installation et les procédures internes d'intervention en cas d'incident ou d'accident.
- ❖ les moyens techniques, humains et organisationnels mobilisables.
- ❖ les procédures à mettre en œuvre lors du déclenchement d'un sinistre.

3-Le plan d'organisation des secours en cas de catastrophe (ORSEC)

Le plan ORSEC a pour objet la prise en charge de tout évènement grave menaçant les biens, les personnes et l'environnement, notamment les catastrophes liées aux risques majeurs prévus à l'article 10 de la loi n° 04-20 du 13 Dhou El Kaâda 1425 correspondant au 25 décembre 2004, susvisée. Il recense l'ensemble des ressources humaines et matérielles à mettre en œuvre en cas de catastrophe et permet d'organiser et de coordonner les actions à entreprendre.

Selon l'importance de la catastrophe et/ou des moyens à mettre en œuvre, les plans ORSEC se subdivisent en :

- ❖ plans ORSEC nationaux, pour les catastrophes touchant une large partie du pays ou nécessitant la mobilisation nationale.
- ❖ plans ORSEC inter-wilaya, couvrant plusieurs wilayas en cas d'évènement régionalisé.
- ❖ plans ORSEC de wilaya, pour la situation à l'échelle d'une wilaya.
- ❖ plans ORSEC communaux, spécifiques à une commune.
- ❖ plans ORSEC des sites sensibles, adaptés aux installations à hauts risques.

Le plan ORSEC organise la conduite opérationnelle des secours, le commandement, la coordination des moyens entre forces publiques, sociétés, ONG, etc. Il est déclenché selon la gravité ou l'étendue de la catastrophe. Bien que prévu par la loi n° 04-20 depuis 2004, le plan ORSEC n'a été officiellement mis en œuvre qu'à partir de 2019 (*décret exécutif n° 19-59 du 10 février 2019*), ce qui a marqué une avancée dans la structuration opérationnelle de la gestion de crise en Algérie (*Journal officiel du 10 février 2019, art. n° 19-59, P7-11*).

Il est important de noter qu'en 2024, une nouvelle loi, la loi n° 24-04 du 26 février 2024, a été promulguée pour renforcer et enrichir le cadre légal de prévention, d'intervention et de réduction des risques de catastrophes, complétant ainsi la loi n° 04-20, notamment en élargissant les risques pris en compte dont le nombre passe de dix à quinze (*Journal officiel du 6 mars 2024, P5-14*) :

- ✓ les risques sismiques ;
- ✓ les risques géologiques ;
- ✓ les risques d'inondations ;
- ✓ les risques climatiques extrêmes ;
- ✓ les risques d'incendies de forêt ;
- ✓ les risques industriels et énergétiques ;
- ✓ les risques spatiaux ;

- ✓ les risques radiologiques et nucléaires ;
- ✓ les risques affectant la santé humaine ;
- ✓ les risques affectant la santé animale et végétale ;
- ✓ les risques de pollution atmosphérique, marine et hydrique ;
- ✓ les risques des regroupements humains importants ;
- ✓ les risques de désertification ;
- ✓ les risques de sécheresse ;
- ✓ les risques d'érosion du littoral et d'élévation du niveau de la mer ;
- ✓ les risques cybernétiques ;
- ✓ les risques acridiens ;
- ✓ les risques biotechnologiques.

I-9- Conclusion

L'emballlement thermique constitue l'un des phénomènes accidentels les plus redoutés dans l'industrie chimique et pétrochimique. Il résulte principalement d'une défaillance du système de refroidissement : lorsque l'énergie générée par la réaction excède l'énergie dissipée, le bilan thermique devient positif, déclenchant ainsi une réaction incontrôlée.

Toutes les installations manipulant des substances dangereuses peuvent être concernées : les réacteurs, les unités de transformation, les dispositifs de stockage et de transport, ou encore les systèmes de conditionnement. Dans un réacteur confiné, ce risque est amplifié par le contraste entre l'évolution exponentielle de la chaleur produite, liée à la température, et l'évacuation linéaire de la chaleur, ce qui explique la rapidité de l'emballlement en cas de perte du système de refroidissement. Le modèle de Semenov illustre cette dynamique par deux points d'intersection : un point stable (S), où l'équilibre thermique est assuré, et un point instable (I), où l'emballlement thermique est inévitable

Les travaux de Gygas précisent ce processus à travers six étapes, chacune associée à une interrogation clé, guidant l'évaluation du risque. Cette approche est complétée par l'analyse de quatre températures caractéristiques du procédé, dont les positions relatives permettent de classer les scénarios d'emballlement en niveaux de gravité : faible, moyen ou critique.

Si le nombre d'incidents se limitent à des hausses modérées de température. Certains débouchent sur de véritables explosions thermiques, générant une libération massive d'énergie, de gaz toxiques ou inflammables, aux conséquences humaines, matérielles et environnementales dramatiques. Des catastrophes comme Seveso et Bhopal en sont des exemples emblématiques. En Algérie, les accidents de Skikda (2004) et d'Arzew (2007) illustrent tragiquement l'ampleur de ce risque et la nécessité d'une maîtrise rigoureuse des procédés industriels.

Chapitre II

Les arbres des défaillances cohérents

Sommaire du chapitre II

II-1-Introduction.....	48
II-2- L'arbre des défaillances	49
II-3- Le but de la méthode	51
II-4- La mise en œuvre de la méthode	52
II-4-1- L'objectif de l'arbre des défaillances	54
II-4-2- Définition de l'événement principal.....	54
II-4-3- Définition du champ d'application de l'arbre des défaillances	54
II-4-4- Définition de la résolution de l'arbre des défaillances.....	55
II-4-5- Définition des règles de base de l'arbre des défaillances	55
II-4-6- Construction de l'arbre des défaillances	56
II-4-7- L'exploitation de l'arbre des défaillances	57
II-4-8- Interprétation de l'arbre des défaillances	58
II-5- La fonction de structure.....	58
La définition de la cohérence	61
1- La propriété de monotonie.....	61
2- La propriété de pertinence	63
II-6- L'analyse qualitative	63
II-6-1- Coupes et coupes minimales	64
II-6-1-1- Les coupes.....	64
II-6-1-2- les coupes minimales	65
II-6- 2- les coupes minimales pour un arbre de défaillances cohérent	66
II-6-2-1- Les lois algébriques booléennes.....	66
II-6-2-2- La méthode descendante (top-down)	67
II-6-2-3- La méthode ascendante (Bottom-up)	69
II-7- L'analyse quantitative	69
II-7-1-Les paramètres de l'analyse quantitative	70
II-7-1-1-La fiabilité (<i>Reliability</i>).....	70
II-7-1-2- La disponibilité (<i>Availability</i>)	70

II-7-1-3- L'intensité de défaillance	71
II-7-1-4-Le nombre prévu de défaillances	71
II-7-2- Probabilité de défaillance des composants.....	71
II-7-2-1-Le composant est irréparable	72
II-7-2-2-Le composant est réparable (défaillance détectée)	72
II-7-2-3- Défaillance non détectée	73
II-7-3- Calcul de la probabilité de l'événement sommet.....	74
II-7-3-1- La méthode de la fonction de structure.....	74
II-7-3-2- Le théorème de Shannon.....	75
II-7-3-3- La méthode du développement d'inclusion – exclusion.....	78
II-7-3-4- Les méthodes approximatives.....	79
1- L'approximation des événements rares	79
2 - La borne inférieure.....	80
2- La borne supérieure des coupes minimales.....	80
II-7-3-5- La méthode du diagramme de décision binaire	81
II-7-4- Les facteurs d'importance.....	85
II-7-4-1- Les facteurs d'importance déterministes	86
II-7-4-2- Les facteurs d'importance probabilistes	88
1 - Le facteur d'importance de Birnbaum	88
2 - Le facteur d'importance critique.....	89
3 - Le facteur d'importance de Fussell-Vesely	89
4 - Le facteur de diminution du risque	90
5 - Le facteur d'augmentation du risque	90
II-8- Conclusion	92

II-1-Introduction

L'emballlement thermique résulte principalement d'une défaillance du système de refroidissement. Afin de prévenir ce risque, il est essentiel d'optimiser la fiabilité du dispositif d'évacuation de la chaleur générée au sein d'un réacteur chimique ou pétrochimique pour pouvoir garder un équilibre entre la chaleur évacuée et celle produite.

La prévention de la défaillance du système de refroidissement repose sur l'utilisation des méthodes d'analyse des risques issues de la sûreté de fonctionnement. Cette discipline a pour objectif principal d'identifier et d'évaluer les risques potentiels, de prévoir l'occurrence des défaillances et de réduire autant que possible les conséquences des catastrophes lorsqu'elles surviennent. Apparue au milieu du XX^e siècle, elle s'appuie sur un ensemble de méthodes et d'outils permettant d'analyser la fiabilité et la sécurité des systèmes technologiques (Imakhlaf, 2021; Kharouati Aicha, 2021; Merle et Roussel, 2007; Santiago, 2007)

Les méthodes d'analyse de la fiabilité et des risques se sont progressivement développées au fil des années, grâce à diverses initiatives majeures. Parmi les travaux fondateurs, il convient de souligner les recherches menées en Allemagne sur les systèmes de missiles durant la Seconde Guerre mondiale, ainsi que le développement de méthodes de fiabilité pour les équipements de défense par le département de la Défense des États-Unis. Par ailleurs, au Royaume-Uni, les contributions de Trevor Kletz, dans le domaine de l'analyse des risques, ainsi que celles de Green et Bourne dans le développement des méthodes de fiabilité, méritent tous d'être mentionnées (Andrews et Moss, 2002).

Il existe une grande variété de méthodes pour l'analyse des risques des procédés. Parmi les plus courantes, figurent l'Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité (AMDEC), l'Analyse Préliminaire de Risques (APR), et l'étude Hazard and Operability studies (HAZOP), toutefois, la méthode la plus largement utilisée demeure l'arbre des défaillances (ADD). Cette technique repose sur l'identification systématique des causes pouvant conduire à l'événement principal redouté. Elle s'appuie sur une démarche déductive : l'événement redouté étant connu, l'analyste remonte du sommet de l'arbre jusqu'aux événements de base responsables de sa survenue (Berdouzi, 2017; Debray et al., 2006; El Harabi, 2011; Khan et al., 2015; Laurent, 2011)

La complexité croissante des systèmes industriels actuels, marqué par les nombreuses interactions entre les composants techniques, opérateurs humains et environnement, a conduit au développement de plusieurs extensions de l'arbre des défaillances, parmi celles-ci

figurent L'ADD dynamique, l'ADD à multi états, l'ADD à retard et l'ADD non cohérent, cette dernière bien que conceptualisée depuis les années 1970, n'a réellement connue une généralisation de son emploi qu'au début des années 2000 (Kabir, 2017; Limnios, 2013)

Dans cette étude, sont utilisés à la fois les arbres des défaillances cohérents et les arbres des défaillances non-cohérents.

II-2- L'arbre des défaillances

Il s'agit de la méthode la plus couramment utilisée dans de nombreux domaines, en raison de sa structure arborescente qui facilite la compréhension, même pour les non-spécialistes des techniques de la fiabilité. Cette approche met en relation les conséquences et leurs causes au sein d'un schéma appelé « arbre des défaillances » (ou arbre des fautes). Ce diagramme permet de visualiser, de manière synthétique, les différents scénarios menant à une défaillance à partir de leurs origines, rendant l'analyse accessible et efficace pour l'identification des points critiques d'un système.

L'analyse par arbre des défaillances (ou Fault Tree Analysis, FTA) est la première méthode développée pour une évaluation systématique des risques. Elle a été mise au point en 1962 par les ingénieurs des laboratoires Bell Téléphone, sous la direction de H.A.Watson, afin d'évaluer et d'améliorer la fiabilité du système de lancement du missile balistique intercontinental Minuteman. Par la suite, la société Boeing, ainsi que d'autres acteurs du secteur aéronautique, ont contribué à développer et formaliser la méthode.(Andrews et Moss, 2002 ; Bobbio et al. 2001 ; Debray et al. 2006 ; Laurent, 2011 ; Vesely et al. 1981 ; Villemeur, 1988)

Aujourd'hui, elle est largement utilisée dans de nombreux domaines tels que l'aéronautique (Cavallotti, 2025; Lübbe et Bertram, 2024; Shi et al., 2025), l'industrie chimique (Guetarni et al., 2019; Nehal et al., 2023; Talebberrouane et al., 2016), le transport maritime (Khungla et al., 2024; Sahin et al., 2021; Ünal et Arıcan, 2025), le nucléaire (Boufenar and Merrouche, 2023; Purba et al., 2020; Xiao et al., 2024), et la médecine (Ashraf et al., 2022; Huang et al., 2025; Rasouli et al., 2021).

La méthode de l'arbre des défaillances (FTA) est continuellement adoptée pour l'analyse des systèmes variés à travers le monde et s'applique également aux secteurs de la robotique et des logiciels. Elle constitue aujourd'hui un outil incontournable pour l'évaluation des systèmes complexes. Son objectif est d'identifier les événements susceptibles de provoquer des défaillances majeurs et d'examiner les causes des accidents afin de garantir la sécurité, la

fiabilité et la disponibilité des installations. En d'autres termes, la FTA ne se limite pas à la recherche de la cause racine, mais fournit également une véritable évaluation de risques.

L'utilisation de cette méthode a permis aux ingénieurs et analystes de sécurité d'identifier les éléments critiques du système, d'évaluer sa fiabilité et de hiérarchiser les modes de défaillance afin de définir des mesures correctives visant à améliorer son fonctionnement et à renforcer sa sécurité. Grâce à ses capacités, l'analyse par arbre des défaillances constitue un outil incontournable pour assurer la sécurité fonctionnelle, satisfaire aux exigences réglementaires et soutenir une prise de décision fondée sur l'évaluation des risques. Une analyse complète et approfondie réalisée par E.Ruijters et M.Stoelinga (Ruijters et Stoelinga, 2015), portant sur l'examen de 150 publications, met en évidence l'applicabilité étendue de la FTA ainsi que l'évolution de cette méthode au fil du temps.

Dans le domaine de l'industrie chimique et pétrochimique, l'utilisation de l'analyse par arbre des défaillances a commencé très tôt, dès son apparition en 1962. Ce secteur, en raison de son importance économique mondiale, a rapidement adopté cette méthode. En 2021, l'industrie chimique générait 4,73 trillion de dollars américains de revenu pour l'économie internationale, et fournissait et continue toujours à fournir une large gamme de produits et de matières premières indispensables à d'autres secteurs industriels, tels que la pharmacie, l'agriculture et les biens de consommation (Ab Rahim et al., 2024).

Cependant, la complexité de ces industries, combinée à la présence de grandes quantités de produits chimiques sur les sites, peut entraîner des risques majeurs pour les installations et leur environnement. Parmi ces risques figurent les incendies, les explosions et les emballements thermiques qui ont touché plusieurs pays au cours des dernières décennies. L'utilisation de l'arbre des défaillances pour analyser ces risques s'est révélée particulièrement efficace pour renforcer la sécurité dans ce secteur, comme le montre la revue d'Ab Rahim et al. (2024). Cette méthode est fréquemment employée, soit individuellement, soit en combinaison avec d'autres approches qui s'appuient sur sa structure, telles que les réseaux bayésiens, les réseaux de pétri et les réseaux de neurones afin d'améliorer la robustesse et la fiabilité de l'analyse de la sécurité (Sarbayev et al., 2019; Talebberrouane et al., 2016).

Notre travail s'inscrit dans le domaine de l'industrie pétrochimique, un secteur particulièrement exposé aux risques majeurs en raison des conditions opératoires sévères et de la nature des substances manipulées. Parmi ces risques, l'emballement thermique constitue l'un des scénarios accidentels les plus critiques, en raison de son caractère soudain, de sa difficulté

de maîtrise et des conséquences potentiellement catastrophiques qu'il peut entraîner pour les équipements, le personnel et l'environnement.

Dans ce contexte, notre étude vise à analyser ce phénomène à l'aide de la méthode des arbres des défaillances (FTA). Cette approche permet d'identifier de manière systématique les causes potentielles pouvant conduire à l'emballement thermique, d'évaluer leur contribution respective au scénario et de préparer le terrain à d'autres méthodes d'analyse, qui viendront compléter et approfondir l'étude.

II-3-Le but de la méthode

La méthode de l'arbre des défaillances a pour objectif d'identifier, de manière systématique, l'ensemble des combinaisons possibles d'événements susceptibles de conduire à la réalisation d'un événement indésirable unique, appelé « événement redouté ». Elle consiste à représenter graphiquement ces combinaisons sous la forme d'une structure arborescente, faisant intervenir des opérateurs logiques (portes « ET », « OU » et « NOT »), afin de modéliser les liens de causalité entre les différents événements contributifs (Ehiagwina et al., 2022; Laurent, 2011; Niel et Craye, 2002).

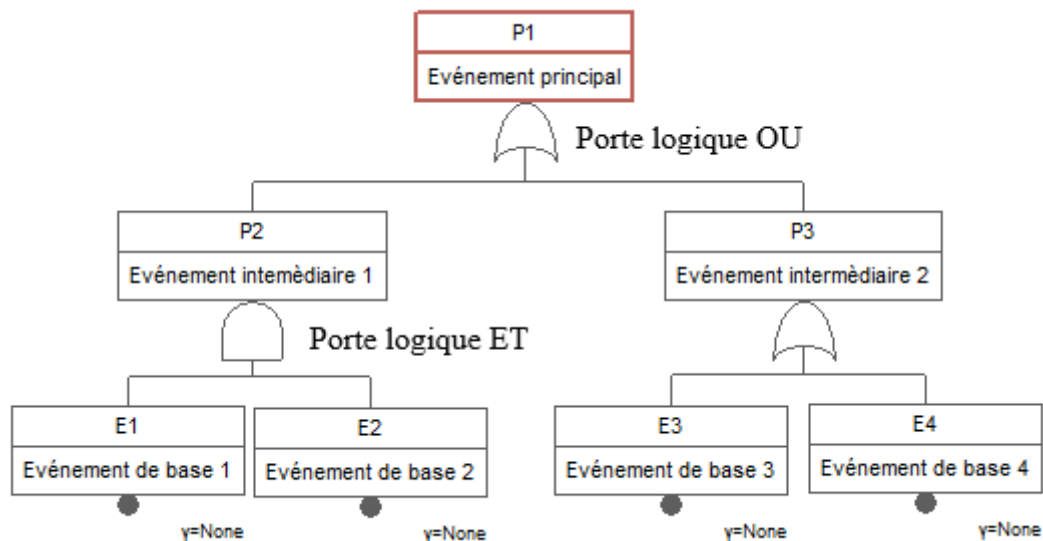


Figure II-1 Exemple d'arbre des défaillances cohérent

Il s'agit d'une méthode déductive qui permet d'identifier l'ensemble des causes possibles d'un événement final unique, clairement défini au début de l'étude, et de représenter ces causes sous forme d'un arbre en s'appuyant sur un certain nombre de règles et de principes logiques.

Le sommet de l'arbre représente l'évènement principal, les branches correspondent aux événements intermédiaires, et les racines désignent les événements de base comme l'illustre la figure II-1, ces événements fondamentaux regroupent les défauts liés aux défaillances d'équipements et de matériels, aux erreurs humaines, aux défauts logiciels, aux lacunes organisationnelles ainsi qu'aux facteurs environnementaux (Andrews et Lunt, 2012; Debray et al., 2006; Trivedi et Bobbio, 2017; Vesely et al., 1981)

L'évènement principal, ou événement indésirable, correspond à tout risque redouté, tel qu'une explosion, une surpression, une perte totale de la production, une dispersion d'un gaz toxique ou un emballement thermique. Les événements intermédiaires représentent des sous-systèmes du système principal, décomposables en sous-systèmes plus détaillés jusqu'à atteindre les événements de base ou élémentaires. Ces derniers sont indivisibles et constituent les causes fondamentales de la réalisation de l'évènement redouté.

II-4- La mise en œuvre de la méthode

Avant d'élaborer l'arbre des défaillances, il est indispensable de réaliser une étude approfondie du système analysé. Cette première étape vise à recueillir un maximum d'informations, que le système soit opérationnel ou en phase de conception. Ces données permettent de délimiter précisément le périmètre de l'étude ainsi que ses objectifs (sécurité ou fiabilité/disponibilité). Il s'agit notamment de comprendre la structure du système, tant sur le plan organisationnel que fonctionnel, et d'identifier les événements redoutés pouvant en découler (Laurent, 2011; Niel et Craye, 2002).

Cette phase revêt un caractère pluridisciplinaire et, de fait, requiert la mobilisation de l'ensemble des compétences pertinentes. Elle constitue généralement l'étape la plus longue lors de l'analyse du risque d'un système.

Une fois l'étude du système achevée, l'évènement redouté défini et les frontières du système par rapport à son environnement clairement établies, il devient possible de construire l'arbre correspondant à cet événement. Pour chaque événement indésirable identifié, un arbre des défaillances (ADD) distinct doit être réalisé (Stamatelatos et al., 2002)

L'élaboration d'un arbre des défaillances nécessite, l'application des étapes suivantes :

1-Identification de l'objectif de l'arbre des défaillances (ADD)

2-Définition de l'évènement principal redouté

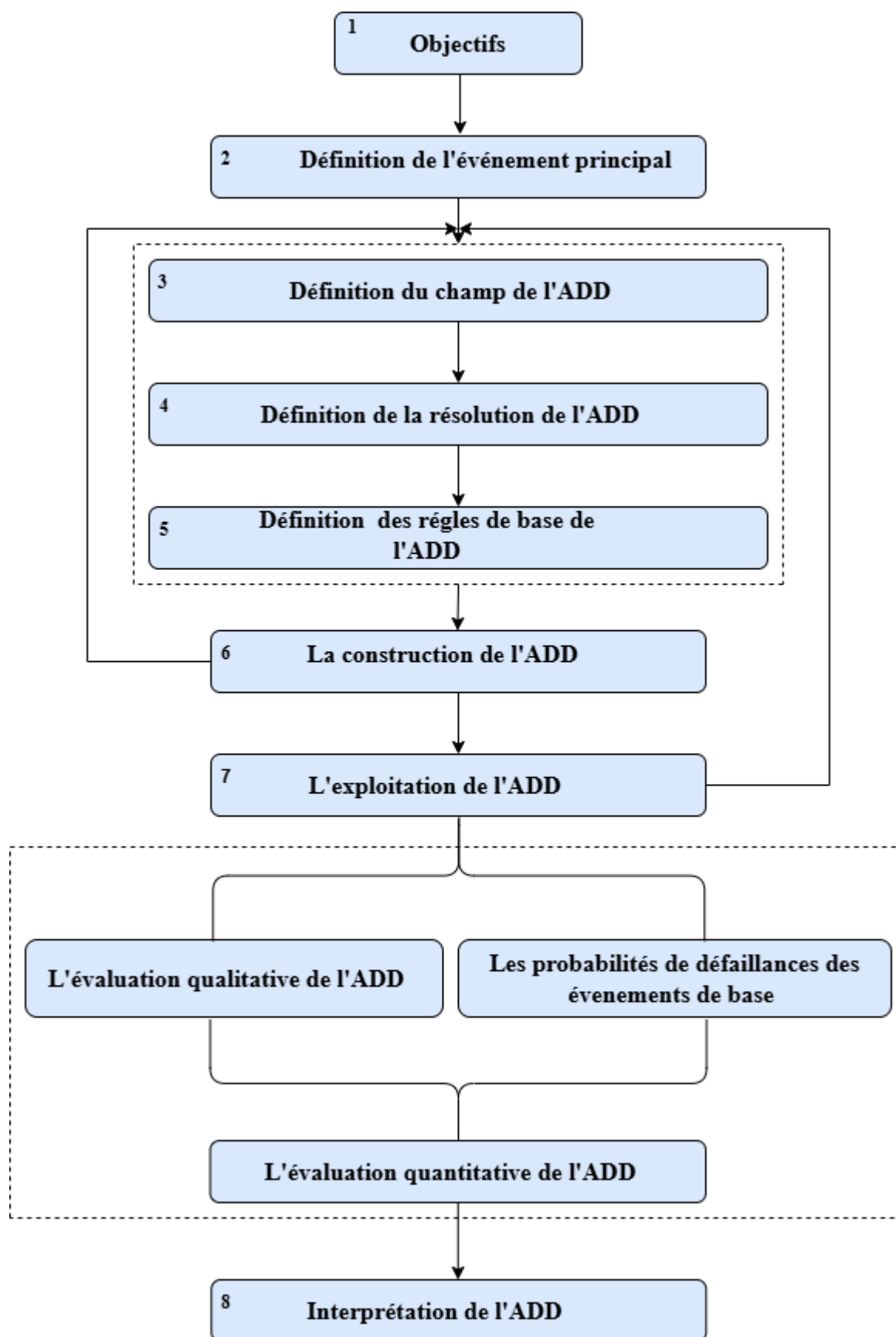


Figure II-2 Les étapes de l'élaboration de l'arbre des défaillances

3-Définition du champ d'application de l'ADD

4-Définition de la résolution de l'ADD

5-Définition des règles de base d'élaboration de l'ADD

6-Construction de l'ADD

7-Evaluation de l'ADD

8-Interprétation et présentation des résultats.

La figure II-2 illustre les différentes étapes de l'élaboration de l'arbre de défaillance

II-4-1- L'objectif de l'arbre des défaillances

Définir l'objectif de l'arbre des défaillances avant son élaboration est essentiel. Cela permet à l'analyste de répondre précisément aux attentes des décideurs ou des responsables ayant sollicité l'analyse du système à étudier. Pour garantir la pertinence de l'analyse, l'objectif doit être formulé en termes de défaillance du système considéré. Par exemple, si l'objectif général consiste à comparer différentes conceptions dans le cadre d'une mission, il convient d'identifier la défaillance particulière caractérisant l'échec de la mission, laquelle sera analysée pour évaluer les exigences associées à la conception (Stamatelatos et al., 2002)

II-4-2- Définition de l'événement principal

L'évènement redouté, également désigné comme l'événement principal, correspond à tout événement non souhaité que l'analyste, le responsable du système ou la population souhaite éviter, il peut s'agir aussi bien d'un incident mineur que d'une catastrophe majeure. Sa définition claire et précise est primordiale pour garantir la pertinence de l'analyse des risques associés et la réussite de la construction de l'arbre des défaillances correspondant. En effet, une caractérisation rigoureuse de l'événement redouté permet d'orienter efficacement l'étude des causes possibles et d'identifier les mesures de maîtrise adaptée (Ehiagwina et al., 2022; Laurent, 2011; Niel and Craye, 2002; Stamatelatos et al., 2002; Vesely et al., 1981; Villemeur, 1988). L'événement principal est systématiquement identifié au moyen de méthode d'analyse reconnues, telles que l'APR, l'AMDEC ou HAZOP.

II-4-3- Définition du champ d'application de l'arbre des défaillances

Le champ de l'analyse de l'ADD :

1-indique les défaillances et les facteurs contributifs qui seront inclus et ceux qui ne le seront pas. (Sont inclus que les événements de base qui contribuent à la réalisation de l'événement non désiré)

2-comprend également la version de conception particulière et la période historique pertinente pour le système qui sera analysé.

3- inclut les conditions limites de l'analyse.

Les conditions limites comprennent les états initiaux des composants et les entrées supposées du système.

L'analyse par arbre des défaillances offre une représentation instantanée de l'état d'un système à un moment donné, pour une configuration et des limites spécifiées. Supposons, par exemple, lorsqu'il s'agit d'analyser la défaillance d'un système de commande de vol. La première étape consiste à définir précisément la portée de l'étude : Il s'agit d'identifier la version du système à examiner, de déterminer les modes de fonctionnement pertinents, de recenser les défaillances des composants à considérer, et de spécifier les interfaces du système (par exemple les systèmes de soutien, les signaux d'actionnement), qui seront incluses dans la modélisation des défaillances, ou supposées pleinement fonctionnelles (Stamatelatos et al., 2002; Villemeur, 1988).

II-4-4- Définition de la résolution de l'arbre des défaillances

La résolution de l'ADD correspond au niveau de détail jusqu'auquel sont développées les causes menant à l'événement principal. Si l'événement principal concerne une défaillance fonctionnelle du système, telle qu'un dysfonctionnement ou un arrêt involontaire, la résolution aboutit généralement à l'identification des composants principaux du système, par exemple les vannes, les pompes et les modules de commande.

En revanche, si l'événement principal est une défaillance phénoménologique, comme une explosion catastrophique d'un moteur, la résolution dépendra du degré de détail avec lequel les causes de ce phénomène sont modélisées. Ce choix de résolution vise à assurer que l'analyse reste pertinente et exploitable pour la gestion des risques et la fiabilité du système, tout en évitant une modélisation inutilement détaillée ou, à l'inverse trop superficielle (Stamatelatos et al., 2002; Villemeur, 1988).

II-4-5- Définition des règles de base de l'arbre des défaillances

Pour faciliter la construction d'un arbre de défaillance (ADD) et garantir la cohérence entre différents arbres, notamment lorsqu'ils sont élaborés par des personnes différentes, des règles de base ont été établies. Ces règles précisent notamment la façon de modéliser les défaillances de composants spécifiques, les erreurs humaines et les défaillances de causes communes. Villemeur (1988) a mis quatre en évidence (Laurent, 2011; Stamatelatos et al., 2002; Vesely et al., 1981; Villemeur, 1988).

- 1- Pas de miracle, lorsque le fonctionnement normal d'un composant propage une séquence de défauts, il est supposé que ce composant fonctionne normalement. À l'inverse, si une défaillance fortuite d'un composant interrompt une séquence de défauts et empêche l'aboutissement à l'événement redouté, cela constitue un « miracle » qui ne doit pas être retenu dans la logique de développement de l'arbre. Ainsi, pour assurer la cohérence, l'arbre des défaillances ne doit pas inclure de situations où une panne aurait un effet correctif sur le système, ce qui rendrait l'analyse incohérente.
- 2- Compléter les portes : Avant d'entamer le développement détaillé de l'un des événements d'entrée d'une porte logique (ET, OU, etc.), Il est indispensable de spécifier l'ensemble des événements d'entrée de cette porte. Cela garantit que la logique de l'arbre des défaillances demeure cohérente et exhaustive, évitant tout oubli ou incohérence dans l'analyse. En procédant ainsi, chaque porte logique est pleinement définie avant l'analyse détaillée de ses ramifications, ce qui facilite la collaboration, la relecture et la validation de l'arbre par différentes parties prenantes.
- 3- Pas de porte à porte, dans l'arbre des défaillances, il est important de ne pas connecter directement une porte logique à une autre. Cette précaution permet d'éviter de sauter des étapes essentielles dans la démarche déductive, garantissant ainsi une analyse rigoureuse et complète du système.
- 4- Les causes sont antérieures aux conséquences : la recherche des causes d'un événement conduit à remonter dans le temps, car les causes précèdent l'apparition de cet événement ; cette règle permet notamment d'éliminer certaines causes et facilite la résolution des systèmes bouclés.

Vesely et al (2002) ajoutent deux autres règles fondamentales à respecter pour élaborer un arbre de défaillance efficace et fiable.

- 5- Identifiez et nommez l'événement indésirable, les événements intermédiaires et les événements de base tels qu'ils apparaissent, puis placez chacun dans sa case afin de refléter clairement leur rôle au sein de l'arbre de défaillance.
- 6- Si la réponse à la question «Ce défaut peut-il être dû à une défaillance d'un composant ? » Est « Oui », classez l'événement comme « défaut d'état de composant ». Sinon, classez-le comme « défaut d'état du système ».

II-4-6- Construction de l'arbre des défaillances

Les étapes précédentes permettent de construire efficacement l'arbre des défaillances. Cette construction s'effectue par un raisonnement logique partant de l'événement final indésirable, puis remontant à travers des combinaisons d'événements intermédiaires jusqu'aux événements élémentaires (événements de base). Ces événements de base doivent respecter certaines conditions :

- 1- Ils doivent être indépendants les uns des autres.
- 2- Ils ne doivent pas pouvoir être décomposés en éléments plus simples, soit parce que cela est impossible, soit parce que cela n'est plus nécessaire.
- 3- Ils doivent être quantifiables en termes de probabilité d'apparition.

II-4-7- L'exploitation de l'arbre des défaillances

L'exploitation ou l'évaluation de l'arbre des défaillances permet d'estimer la probabilité de l'événement principal et de s'assurer que toutes les mesures possibles ont été effectivement envisagées pour prévenir le risque associé.

L'évaluation de l'arbre des défaillances se fait selon deux approches : qualitative et quantitative.

L'analyse qualitative a pour objectif de déterminer toutes les causes possibles de la défaillance du système :

- 1- Pour les arbres des défaillances cohérents, chaque cause possible menant à la défaillance du système est appelée coupe minimale de l'arbre des défaillances.
- 2- Pour les arbres de défaillances non-cohérents, les causes des défaillances du système sont désignées par le terme des impliquant premiers

L'analyse quantitative a pour objectif de quantifier les différents paramètres qui sont en relation avec la disponibilité et la fiabilité du système.

Les principaux paramètres sont :

- 1- la probabilité d'occurrence de l'événement principal ou l'indisponibilité du système.
- 2- les probabilités d'occurrences des événements intermédiaires ou leurs indisponibilités respectives.
- 3- la défiabilité du système.
- 4- l'intensité de défaillance
- 5- le nombre prévu de défaillances
- 6- le classement quantitatif de la contribution de chaque composant ou coupe minimale (ou impliquant premiers) dans la réalisation de l'événement principal.

II-4-8- Interprétation de l'arbre des défaillances

L'étape 8 consiste à interpréter et présenter les résultats de l'arbre des défaillances. Cette interprétation doit permettre de dégager des implications concrètes, notamment en évaluant l'impact potentiel sur l'objectif du système analysé. Il s'agit de traduire les résultats qualitatifs et quantitatifs en recommandations opérationnelles pour améliorer la sûreté et la fiabilité.

II-5- La fonction de structure

La fonction de structure est la fonction associée à l'événement indésirable. Il s'agit d'une fonction booléenne qui représente le système en fonction de ces composants. Sa détermination repose sur les hypothèses suivantes :

- 1- Un système à n'importe quel instant ne peut se trouver que dans deux états : l'état de fonctionnement ou l'état de panne ou de défaillance (un système binaire).
- 2- Un système est constitué de n composants numéroté de 1...n.
- 3- les composants qui constituent le système ne peuvent également adopter que deux états : soit en fonctionnement, soit en panne (Beeson, 2002; Birnbaum, 1968; Chaux, 2013; Kaufmann et al., 1977; Villemeur, 1988).
- 4- L'état du système dépend uniquement de l'état de ses composants.

Si pour chaque composant i du système est associée une variable d'état booléenne $x_i \in \{0,1\}$ tel que :

$$x_i = \begin{cases} 1 & \text{si l'événement de base se produit (ne fonctionne pas)} \\ 0 & \text{si l'événement de base ne se produit pas (fonctionne)} \end{cases}$$

Où $x = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \in \{0,1\}^n$ est le vecteur des états des événements de base.

Les événements de base dans un arbre des défaillances correspondent aux défaillances des composants qui constituent le système étudié.

De la même manière associons à l'événement principal ou indésirable une fonction booléenne $\Phi(x)$ qui traduit l'état du système telle que :

$$\Phi(x) = \begin{cases} 1 & \text{si l'événement indésirable se produit (le système ne fonctionne pas)} \\ 0 & \text{si l'événement indésirable ne se produit pas (le système fonctionne)} \end{cases}$$

La fonction booléenne $\Phi(x)$ est appelée « fonction de structure » associée à l'événement indésirable ou « fonction de structure du système ».

Considérons les portes « ET » et « OU », les n événements de base B_i attachés à ces portes, et les variables booléennes x_i associées à ces événements de base.

Calculons les fonctions de structure de ces deux portes.

1- La porte ET.

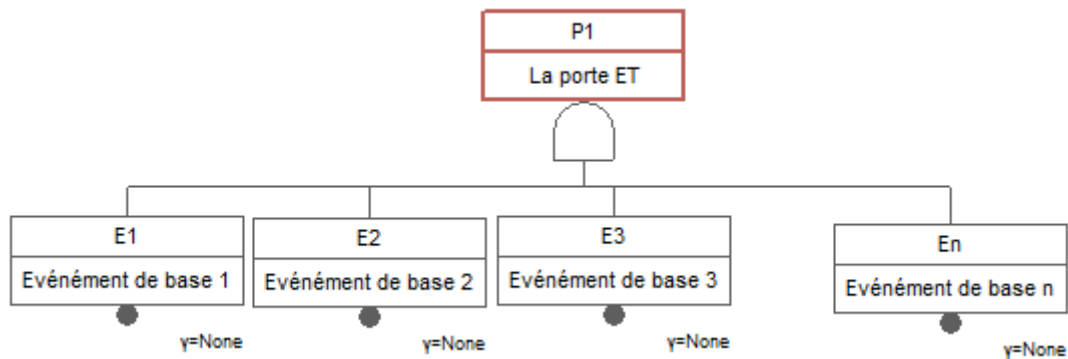


Figure II-3 Exemple d'une porte logique ET

Sa fonction de structure est calculée par l'équation suivante :

$$\Phi(x) = \Phi(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) = \prod_{i=1}^n x_i \quad (\text{II-1})$$

En effet

$$\forall i, x_i = 1 \Rightarrow \Phi(x) = 1$$

$$\exists i, x_i = 0 \Rightarrow \Phi(x) = 0$$

Dans le cas de l'exemple II-3 : $\Phi(x) = E1 \times E2 \times E3 \times \dots \times En$

On dit aussi que c'est la fonction de structure d'un système ou équipement en série.

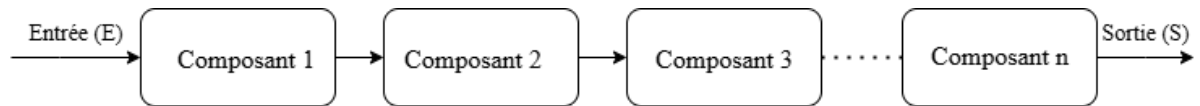


Figure II-4 Un système en série

2- La porte OU

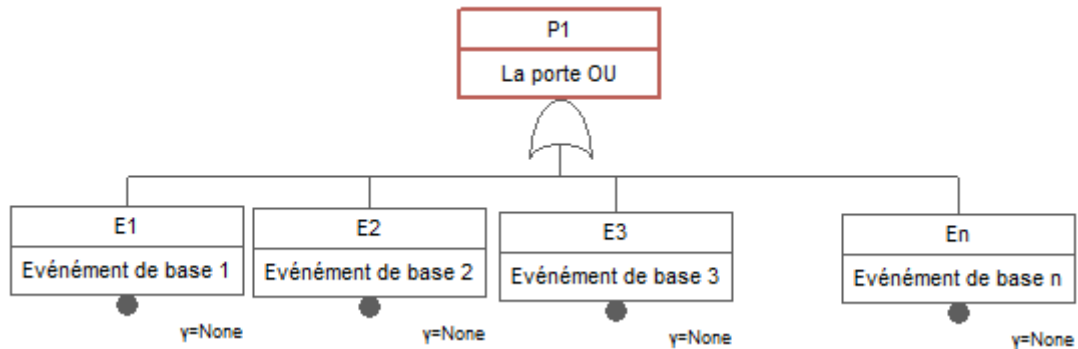


Figure II-5 Exemple d'une porte logique OU

Sa fonction de structure est calculée par l'équation suivante :

$$\Phi(x) = \Phi(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - x_i) \quad (\text{II-2})$$

En effet

$$\forall i, x_i = 0 \Rightarrow \Phi(x) = 0$$

$$\exists i, x_i = 1 \Rightarrow \Phi(x) = 1$$

L'exemple de la figure II-5, sa fonction de structure a l'expression suivante :

$$\Phi(x) = 1 - [(1-E1) (1-E2) (1-E3) \dots (1-En)]$$

C'est la fonction de structure d'un système ou équipement en parallèle (Figure II-6).

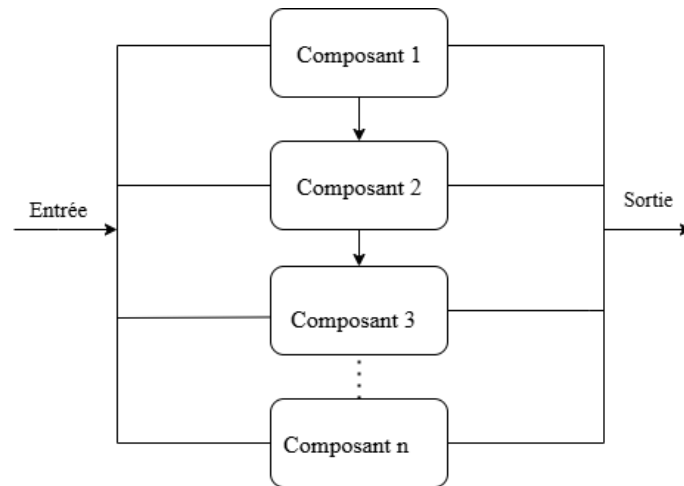


Figure II-6 Un système en parallèle

La définition de la cohérence

Un arbre de défaillance est cohérent si sa fonction de structure $\Phi(x)$ respecte deux propriétés fondamentales : la monotonie et la pertinence.

1- La propriété de monotonie

Une fonction de structure est dite monotone si

$$\forall i \quad \Phi(1_i, x) \geq \Phi(0_i, x) \quad \text{avec } x \in \{0, 1\}^n \quad (\text{II-3})$$

$$\begin{aligned} \text{Ou :} \quad \Phi(1_i, x) &= \Phi(x_1, x_2, \dots, x_{i-1}, 1, x_{i+1}, \dots, x_n) \\ \Phi(0_i, x) &= \Phi(x_1, x_2, \dots, x_{i-1}, 0, x_{i+1}, \dots, x_n) \end{aligned}$$

La fonction de structure d'un arbre des défaillances est monotone si, à mesure que l'état d'un composant du système se détériore, c'est-à-dire passe d'un état fonctionnel à un état défaillant, l'état du système global reste soit identique, soit se détériore également. Autrement dit, la défaillance d'un composant ne peut pas améliorer l'état du système, ce qui traduit une progression croissante de la fonction de structure en fonction des défaillances des composants (Andrews, 2000; Beeson et Andrews, 2004; Beeson, 2002; Ebeling, 2019; Kaufmann et al., 1977; Limnios, 2013; Villemeur, 1988).

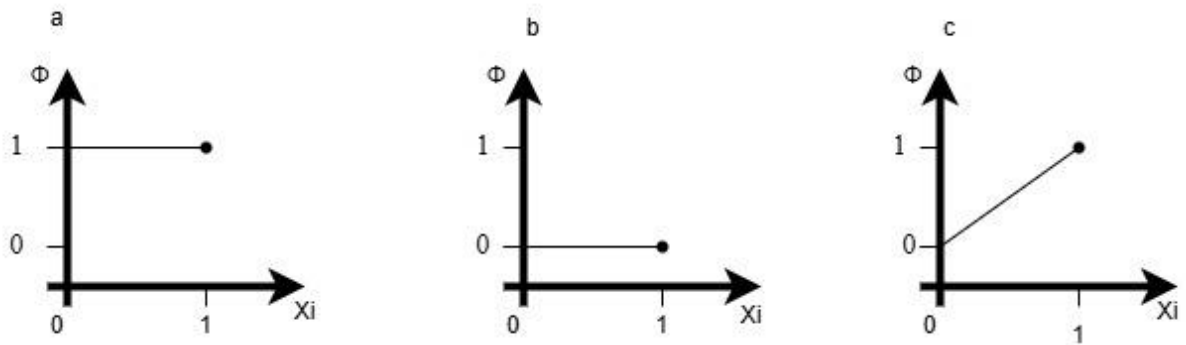


Figure II-7 La fonction de structure monotone et croissante

Cela signifie que si on augmente l'ensemble d'événements défaillants, la fonction de structure ne diminue pas : c'est une fonction monotone croissante. Cette propriété est essentielle pour la cohérence d'un arbre des défaillances, puisqu'elle garantit qu'aucune réparation d'un composant défaillant ne provoque une panne du système, et qu'aucune défaillance d'un composant fonctionnel ne répare le système. Les trois cas possibles de la fonction de structure $\Phi(x)$ monotone croissante sont illustrés par la figure II-7.

Explication :

La figure « II-7 a » illustre la situation où, lorsque le composant i est fonctionnel ($x_i = 0$), le système ne fonctionne pas ($\Phi(x) = 1$), c'est-à-dire que l'événement indésirable s'est produit, cet état résulte des conditions des autres composants du système. Et revanche, lorsque le composant i tombe en panne ($x_i = 1$), l'état du système reste inchangé.

La figure « II-7 b » montre que quand le composant i est fonctionnel ($x_i = 0$), le système fonctionne également. De plus, même si le composant i tombe en panne ($x_i = 1$), le système continue de fonctionner, cela correspond à une situation où le composant i n'est pas critique pour le fonctionnement du système.

La figure « II-7 c » illustre le cas où le système est critique pour le composant i . Lorsque ce composant i fonctionne ($x_i = 0$), le système fonctionne ($\Phi(x) = 0$), mais si le composant i tombe en panne ($x_i = 1$), le système tombe en panne (Andrews, 2000; Beeson et Andrews, 2004; Beeson, 2002).

Quelques exemples de fonctions de structures monotones et croissantes.

Premier exemple : soit le système dont le bloc digramme de fiabilité est le suivant :

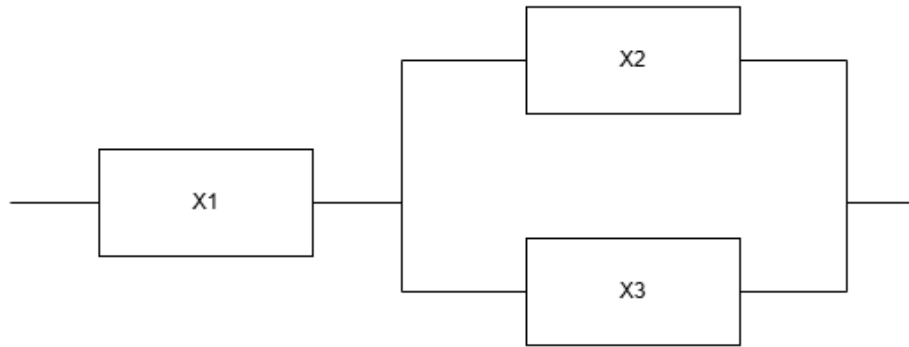


Figure II-8 Exemple d'un système série/parallèle

Sa fonction de structure par application des équations II-1 et II-2.

$$\Phi(x) = \Phi(x_1) \cdot \Phi(x_2, x_3)$$

$$\Phi(x_2, x_3) = 1 - (1 - x_2)(1 - x_3) \quad \text{d'après l'équation II-2}$$

$$\Phi(x_1) = x_1 \quad \text{d'après l'équation II-1}$$

$$\Phi(x) = x_1 [1 - (1 - x_2)(1 - x_3)]$$

Testons la monotonie

$$\Phi(1, 1, 1) = 1$$

$$\Phi(0, 0, 0) = 0$$

$1 > 0$ et $\Phi(1) > \Phi(0)$ donc $\Phi(x)$ est une fonction de structure monotone et croissante

Deuxième exemple : une fonction de structure non monotone

$$\text{Soit } \Phi(x) = 1 - x_1$$

$$\Phi(0) = 1 \text{ et } \Phi(1) = 0$$

$\Phi(1) < \Phi(0)$ donc $\Phi(x)$ est une fonction de structure non monotone

2- La propriété de pertinence

Cette propriété implique que chaque composant est essentiel au système, c'est-à-dire que chacun contribue effectivement à l'état du système. En d'autres termes, la fonction de structure $\Phi(x)$ dépend de manière significative de toutes les variables x_i correspondant aux événements de base. Chaque composant du système a un impact réel sur la défaillance globale. Il ne doit pas exister aucun état du système dans lequel la défaillance d'un composant pourrait paradoxalement « réparer » le système, ni d'état dans lequel la réparation d'un composant

pourrait provoquer une panne (Andrews, 2000; Beeson et Andrews, 2004; Beeson, 2002; Ebeling, 2019; Limnios, 2013).

$$\Phi(1_i, x) \neq \Phi(0_i, x) \quad \text{Pour certains } x$$

Par exemple pour un système à 4 composants si $\Phi(1,1,1,1) = \Phi(1,1,1,0)$ alors le composant 4 n'est pas essentiel pour le système (Ebeling, 2019).

$\Phi(1,1,1,1)$ Indique que les quatre composants du système sont en panne, ce qui implique que le système est lui aussi en panne.

$\Phi(1,1,1,0)$ Indique que le quatrième composant fonctionne, soit grâce à une réparation, soit grâce à un remplacement. Toutefois l'état global du système ne change pas : il reste en panne. Par conséquent, le composant quatre n'est pas essentiel ou pertinent pour le système.

En plus de ces deux conditions, dans un arbre des défaillances cohérent, on utilise que les portes logiques « ET » et « OU » et les variables monoformes (x_i), voir figure II-1.

II-6- L'analyse qualitative

L'analyse qualitative constitue la première étape dans l'exploitation de l'arbre des défaillances. Elle vise à comprendre le comportement du système, en étudiant les mécanismes, les risques, ainsi que les combinaisons ou séquences d'événements pouvant conduire le système à un événement redouté. Cette analyse repose sur l'identification des combinaisons de composants dont la défaillance assure la défaillance du système, appelées coupes (Andrews et Moss, 2002; Hurdle, 2008; Tao, 2010).

II-6-1- Coupes et coupes minimales

À partir de la fonction de structure, Mortureux (2001) définit une coupe comme une combinaison sans lien de causalité d'événements et de conditions suffisantes pour provoquer l'évènement indésirable. Une coupe est dite minimale lorsqu'elle ne contient aucune autre coupe du système. Les coupes minimales permettent d'une part de décrire l'ensemble des défaillances du système de la manière la plus concise possible et d'autre part de faciliter la réalisation des études quantitatives (Beeson, 2002; Duroeulx, 2020; Mortureux, 2002).

II-6-1-1- Les coupes

Considérons la fonction de structure suivante :

$$\Phi(x) = \Phi(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

Et ses composants sont

$$e = \{e_1, e_2, \dots, e_n\}$$

Soit le sous-système de composants « a » tel que : $a = \{e_i, i \in I\} \subset e$ Définit par le sous-système des indices des composants I tel que : $I = \{1, 2, \dots, n\}$.

Si

$$\left. \begin{array}{l} x_i = 1, i \in I \\ x_i = 0, i \notin I \end{array} \right\} \Rightarrow \Phi(x) = 1$$

Le sous-ensemble « a » est une coupe s'il satisfait aux conditions précédentes.

Une coupe est un sous-système constitué de plusieurs composants tel que, si tous les composants de ce sous-système sont en bon état tandis que les autres sont défectueux, le système dans son ensemble demeure fonctionnel.

Considérons la fonction de structure du schéma de la figure II-8 telle que :

$$\Phi(x) = x_1 [1 - (1 - x_2)(1 - x_3)]$$

$$\Phi(x) = x_1 x_3 + x_1 x_2 - x_1 x_2 x_3$$

Prenons le sous-système : $a = \{e_1\}$ et vérifions s'il s'agit d'une coupe. Pour cela la variable booléenne x_1 qui lui correspond est égale à 1. Le sous-système des indices ne contient qu'un seul élément : $I = \{1\}$, ce qui signifie que les variables booléennes correspondant aux deux autres composants sont égales à 0. $x_2 = x_3 = 0$ car elles ne font pas partie du sous-ensemble « a » (Kaufmann et al., 1977).

Remplaçons maintenant ces valeurs dans la fonction de structure $\Phi(x)$.

$$\Phi(x) = 1 [1 - (1 - 0)(1 - 0)] = 0$$

Donc $a = \{e_1\}$ n'est pas une coupe.

Deuxième exemple, vérifions si le sous-ensemble : $a = \{e_1, e_2\}$ est une coupe. L'ensemble des indices $I = \{1, 2\}$.

Leurs variables respectives correspondantes seront mises à 1, tandis que celle de e_3 sera mise à zéro. On a alors :

$$\Phi(x) = 1 [1 - (1 - 1)(1 - 0)] = 1$$

Donc le sous-ensemble « a » est une coupe.

Troisième exemple, vérifions si le sous-ensemble $a = \{e_1, e_2, e_3\}$ est une coupe. On calcule

$$\Phi(x) = 1 [1 - (1 - 1)(1 - 1)] = 1$$

Ainsi « a » est bien une coupe.

II-6-1-2- Les coupes minimales

Une coupe est dite minimale si la combinaison des événements de base qui la composent est nécessaire et suffisante pour provoquer l'événement indésirable. Autrement dit, si un événement est retiré de cette coupe, l'événement principal ne se produit pas.

Une coupe minimale est donc la plus petite combinaison de composants dont la défaillance entraîne la défaillance du système.

Considérons l'exemple précédent dont la fonction de structure :

$$\Phi(x) = x_1 [1 - (1 - x_2)(1 - x_3)]$$

Si « a » est une coupe, telle que $a = \{e_i, i \in I\}$ et qu'il n'existe aucun sous-ensemble $a' \subset a$, qui soit lui aussi une coupe, alors « a » est considérée comme une coupe minimale.

Concernant la fonction de structure $\Phi(x)$. Il existe trois coupes $\{e_1, e_2\}$; $\{e_1, e_3\}$ et

$\{e_1, e_2, e_3\}$. Avec les sous-ensembles $\{e_1\}$ et $\{e_2, e_3\}$ qui ne sont pas des coupes et sont inclus dans les trois autres sous-ensembles, cela permet de conclure que $\{e_1, e_2\}$; $\{e_1, e_3\}$; $\{e_1, e_2, e_3\}$ sont des coupes minimales.

Une coupe minimale est une coupe ne contenant pas d'autres coupes.

II-6-2-Les coupes minimales pour un arbre des défaillances cohérent

Dans les systèmes industriels, un très grand nombre de coupes peut être généré, chacune pouvant résulter de la combinaison de plusieurs événements ou composants. Mais l'intérêt n'est porté que sur celle qui provoque l'événement indésirable, c'est-à-dire les coupes minimales. Pour les déterminer à partir de l'arbre des défaillances cohérent, il est indispensable de recourir aux lois algébriques booléennes, qui permettent de formaliser les portes logiques ainsi que les relations entre les événements.

II-6-2-1- Les lois algébriques booléennes

La recherche des coupes minimales pour un arbre des défaillances s'appuie sur des règles de l'algèbre de Boole en considérant que :

- chaque événement de base est représenté par une variable booléenne (x_i) ;

-L'événement de sortie d'une porte « ET » correspond au produit des variables booléennes associées aux événements d'entrée ;

-L'événement de sortie d'une porte « OU » correspond à la somme des variables booléennes associées aux événements d'entrée.

Dans un arbre des défaillances cohérent, les ensembles de coupes minimales sont généralement déterminés en transformant l'expression logique pour l'événement sommet (ou indésirable) en forme normale disjonctive, également appelée « forme minimale somme-de-produits ».

L'événement indésirable, appelé aussi événement sommet (ou « Top event » en anglais), est désigné par la lettre T.

$$T = C_1 + C_2 + \dots + C_n \quad (\text{II-4})$$

Où :

C_i , $i = 1, \dots, n$, sont les coupes minimales et '+' représente l'opérateur logique somme (OU). Chaque coupe minimale est composée d'un ou de plusieurs événements de base. Ainsi, un ensemble de coupe d'ordre K^{th} peut s'exprimer comme suit :

$$C_i = X_1 . X_2 \dots X_K \quad (\text{II-5})$$

Où :

X_i , $i = 1, \dots, k$, sont les événements de base et '.' est l'opérateur logique « ET ».

Tableau II-1 Les principales lois de l'algèbre de Boole

Propriétés	Produit (ET) (.)	Somme (OU) (+)
Commutativité	$A.B = B.A$	$A + B = B + A$
Associativité	$(A.B).C = A.(B.C)$	$(A + B) + C = A + (B + C)$
Distributivité	$A (B + C) = AB + AC$	$A + (B . C) = (A + B) . (A + C)$
Identités	$A . 0 = 0$; $A . 1 = A$	$A + 0 = A$; $A + 1 = 1$
Idempotence	$A . A = A$	$A + A = A$
Absorption	$A . (A + B) = A$	$A + A.B = A$
Complémentarité	$A . \bar{A} = 0$	$A + \bar{A} = 1$
Le théorème de De Morgan	$\overline{(A . B)} = \bar{A} + \bar{B}$	$\overline{(A + B)} = \bar{A} . \bar{B}$

L'expression logique de l'événement sommet est généralement obtenue à l'aide d'une approche descendante (top-down) ou ascendante (bottom-up). Ensuite, les lois de l'algèbre booléenne sont appliquées pour éliminer toutes les redondances dans l'expression, la réduisant ainsi à une forme minimale requise. Les lois de l'algèbre booléenne utilisées pour les arbres de défaillance sont indiquées dans le tableau II-1. (Andrews et Lunt, 2012 ; Barlow et Chatterjee, 1973 ; Beeson, 2002 ; Ericson, 2014 ; Hurdle, 2008 ; Sharma et Singh, 2015).

II-6-2-2- La méthode descendante (top-down)

L'approche descendante est couramment utilisée pour déterminer les ensembles de coupes minimales d'un arbre de défaillance cohérent. Elle consiste à développer l'expression booléenne de l'événement sommet entièrement en fonction des défaillances des composants de base. Cette méthode débute par la porte supérieure et procède en développant chaque porte en substituant les entrées qui se trouvent directement en dessous. Ce processus est répété jusqu'à ce que l'expression ne comporte plus que des défaillances de composants de base. Les lois de réduction booléennes présentées au tableau II-1 sont également appliquées chaque fois que possible afin de réduire et clarifier l'expression finale. Les types de portes de base qui apparaissent dans un arbre de défaillance cohérent sont la porte « ET » et la porte « OU ».

Exemple : considérant l'arbre des défaillances de la figure II-9, les coupes minimales obtenues en utilisant l'approche descendante sont comme suit :

Commençant par l'événement principal T avec une porte « ET » et deux entrées, P2 et P3

$$P1 = T = P2 \times P3$$

Les portes P2 et P3 peuvent être exprimées comme :

$$P2 = A + P4$$

$$P3 = C + P5$$

$$P4 = B + C$$

$$P5 = A. B = AB$$

En remplaçant P4 et P5 par leurs expressions dans P2 et P3, on obtient

$$P2 = A + B + C$$

$$P3 = C + AB$$

De même, on remplace P2 et P3 par leurs expressions dans P1 ou T, on obtient

$$T = P1 = P2 \times P3$$

$$T = P1 = (A + B + C) (C + AB) = AC + AB + BC + AB + C + ABC$$

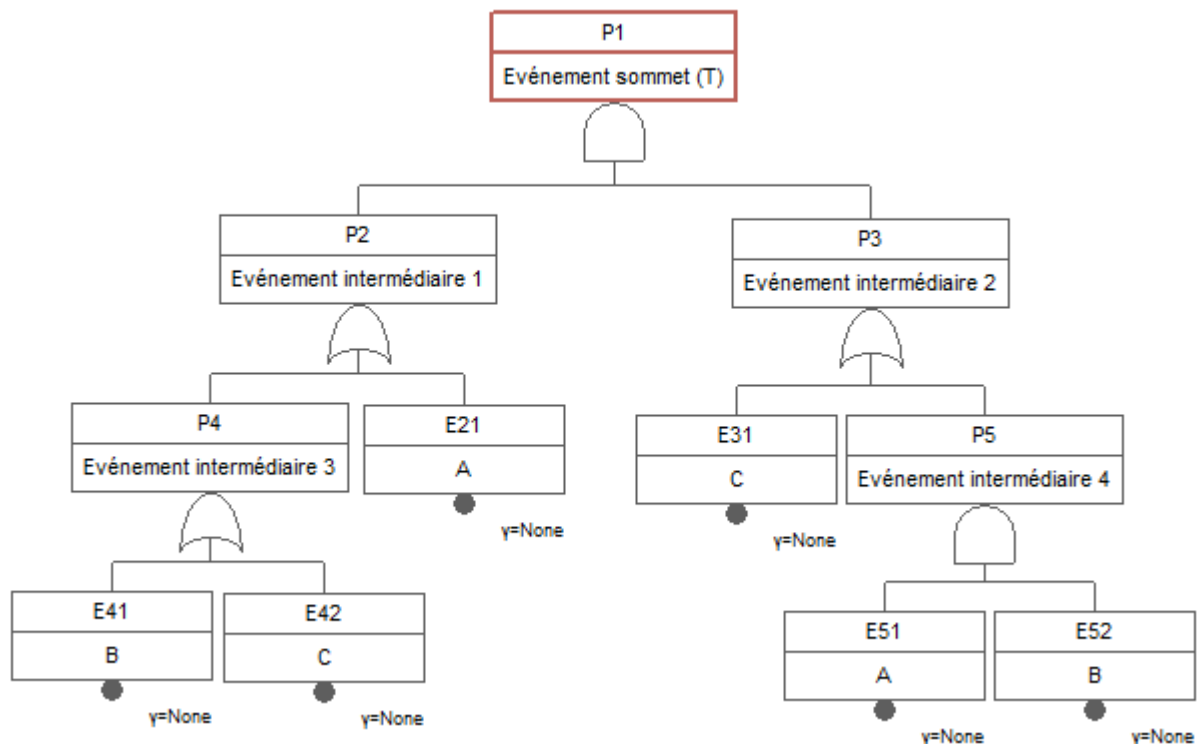


Figure II-9 Exemple d'un arbre des défaillances

En utilisant les lois de l'algèbre de Boole du tableau II-1, l'expression de T ou P1 sera.

$$T = P1 = C + AB$$

Les deux coupes minimales obtenues sont {C} et {AB}. La coupe minimale {C} est une coupe d'ordre 1 : elle ne contient qu'un seul composant. Il s'agit de la coupe du plus petit ordre et celle qui contribue le plus à la survenue de l'événement indésirable. La seconde coupe, {AB}, est d'ordre 2 : les deux composants doivent être simultanément en défaillance pour entraîner la défaillance du système. De manière générale, plus l'ordre d'une coupe minimale est élevé, plus sa contribution à la réalisation de la défaillance du système est faible.

En résumé, l'analyse qualitative permet d'identifier les éléments critiques du système en termes de contribution à la défaillance globale. Dans l'exemple précédent le composant {C} présente la criticité la plus élevée et constitue ainsi le point faible principal du système.

II-6-2-3- La méthode ascendante (Bottom-up)

Elle suit le même principe que l'approche descendante, mais procède en sens inverse : elle part des événements de base pour remonter jusqu'à l'événement principal. .

$$P5 = A. B = AB$$

$$P4 = B + C$$

$$P3 = C + P5$$

$$P2 = A + P4$$

Ainsi de suite jusqu'à arriver à T

II-7- L'analyse quantitative

La deuxième partie de l'exploitation de l'arbre des défaillances est l'analyse quantitative. Elle intervient après l'analyse qualitative et repose sur la quantification des composants. Son objectif est de calculer la fiabilité et la disponibilité du système, ainsi que de déterminer l'importance des composants ou des événements de base afin d'hierarchiser les différentes causes possibles. Cette hiérarchisation permet de concentrer les efforts de prévention sur les causes les plus vraisemblables.

L'analyse qualitative a montré que l'événement principal dépend de ses événements de base. Estimer la probabilité d'occurrence de l'événement sommet (Top event) revient donc à connaître les probabilités de ses événements de base. Ces probabilités sont estimées en faisant appel à différentes méthodes d'analyse quantitative adaptées au contexte tel que :

- les bases de données
- les jugements d'expert
- les essais lorsque cela est possible
- le retour d'expérience sur l'installation ou les installations analogues.

L'analyse quantitative de l'arbre des défaillances requiert au préalable la définition des paramètres considérés.

II-7-1-Les paramètres de l'analyse quantitative

Les paramètres pris en compte dans la quantification de l'arbre des défaillances sont les suivants :

- 1-la fiabilité, $R(t)$
- 2-la disponibilité, $A(t)$
- 3-Intensité de défaillance, $W(t)$
- 4-le nombre de défaillance prévu, $W(t_0, t)$

II-7-1-1-La fiabilité (*Reliability*)

Villemeur (1988) définit **la fiabilité** (*reliability en anglais*) comme l'aptitude d'une entité à accomplir une fonction requise, dans des conditions données et pendant une durée déterminée.

De manière générale, la fiabilité se mesure par la probabilité qu'une entité *E* réalise correctement la fonction attendue, dans les conditions spécifiées, au cours de l'intervalle de temps $[0, t]$.

$$R(t) = P [E \text{ non défaillante sur } [0, t]] \quad (\text{II-6})$$

L'aptitude inverse, appelée **défiabilité**, est quantifiée par la fonction $F(t)$, où F désigne *Failure* en anglais, ou *Unreliability*. Elle représente ainsi la probabilité que l'entité ne remplisse pas sa fonction dans les conditions spécifiées au cours de l'intervalle $[0, t]$.

$$F(t) = 1 - R(t) \quad (\text{II-7})$$

II-7-1-2- La disponibilité (*Availability*)

Selon Villemeur (1988), la **disponibilité** (*Availability en anglais*) d'une entité correspond à sa capacité à accomplir une fonction requise dans des conditions spécifiées, à un instant donné. Elle est généralement exprimée par la probabilité que l'entité *E* soit opérationnelle à l'instant t :

$$A(t) = P [E \text{ non défaillant à l'instant } t] \quad (\text{II-8})$$

L'aptitude inverse, appelée **indisponibilité** (*Unavailability*), est définie par :

$$Q(t) = 1 - A(t) \quad (\text{II-9})$$

C'est la probabilité que le système est en panne à l'instant t .

II-7-1-3- L'intensité de défaillance

L'intensité de défaillance $W(t)$, appelée également « intensité de défaillance inconditionnelle » (Unconditional failure intensity) c'est la probabilité que l'entité tombe en panne dans l'intervalle de temps $(t, t+dt)$ sachant qu'elle était opérationnelle à $t = 0$.

La défaillance du système apparaît si et seulement si un ou plusieurs de ses coupes minimales se réalise. Le taux de défaillance du système est fonction des taux de défaillance de ses coupes minimales.

$$W_s(t) = \sum_{i=1}^n W_i(t) \quad (\text{II-40})$$

II-7-1-4- Le nombre prévu de défaillances

Le nombre prévu de défaillances $W(t_0, t)$ pour une entité réparée, sachant que l'entité est en fonctionnement au temps $t = 0$.

$$W(t_0, t) = \int_{t_1}^{t_2} W(t) dt \quad (\text{II-11})$$

II-7-2- Probabilité de défaillance des composants

Pour évaluer la probabilité de défaillance d'un système, il est nécessaire d'estimer la probabilité de défaillance de chacun de ses composants. Les modèles utilisés pour cette estimation dépendent du mode de maintenance appliqué au composant. Trois situations principales peuvent être distinguées :

- ✚ Le composant est irréparable
- ✚ Le composant est réparable, et sa réparation est effectuée dès que sa défaillance est détectée (défaillance détectée)
- ✚ Le composant est réparable, mais sa réparation n'est entreprise qu'au moment où sa défaillance est découverte (défaillance non détectée).

II-7-2-1-Le composant est irréparable

Lorsqu'un composant ou une entité est irréparable, sa probabilité de défaillance croît avec le temps jusqu'à atteindre la valeur limite de 1, comme l'illustre la figure II-10. Dans ce cas, la fiabilité et la disponibilité sont identiques. Par conséquent, la défiabilité, $F(t)$, et l'indisponibilité, $Q(t)$, sont également identiques. Si, de plus, le composant présente un taux de défaillance constant (λ), ces fonctions s'expriment par l'équation (II-12) (Andrews et Lunt, 2012; Andrews et Moss, 2002; Villemeur, 1988).

$$Q(t) = F(t) = 1 - e^{-\lambda t} \leq \lambda t \quad (\text{II-12})$$

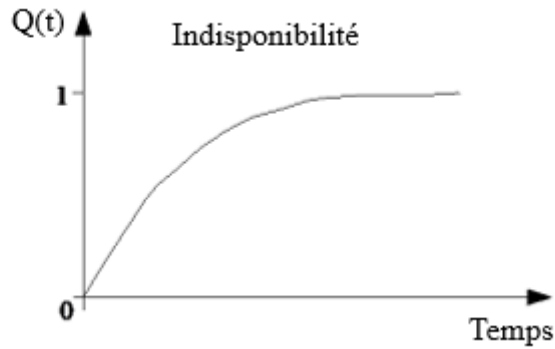


Figure II-10 L'indisponibilité d'un composant irréparable (Andrews et Lunt, 2012).

II-7-2-2-Le composant est réparable (défaillance détectée)

Lorsqu'un composant tombe en panne et qu'il est réparé immédiatement .Il s'agit d'une maintenance corrective non planifiée, déclenchée suite à la défaillance. Pour les composants caractérisés par un taux de défaillance constant (λ) et un taux de réparation constant (μ) , l'indisponibilité à l'instant t , illustrée à la figure II-11, est donnée par l'équation (II-13) (Andrews et Lunt, 2012; Andrews et Moss, 2002; Villemeur, 1988).

$$Q(t) = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} (1 - e^{-(\lambda + \mu)t}) \quad (\text{II-13})$$

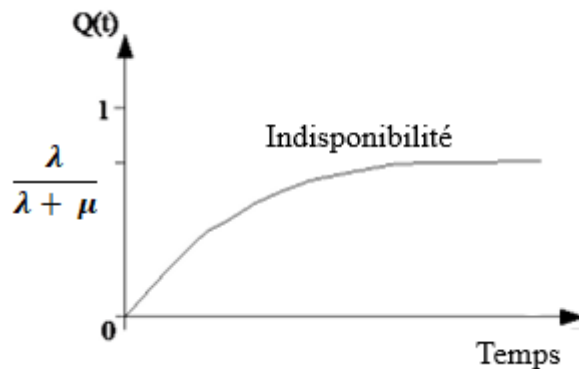


Figure II-11 L'indisponibilité d'un composant réparable (Andrews et Lunt, 2012)

II-7-2-3- Défaillance non détectée

Lorsque les composants font partie de systèmes de secours (standby) ou de sécurité (safety) qui ne sont sollicités que dans des conditions particulières, leurs défaillances peuvent rester inaperçues. Pour ce type de système, des tests périodiques sont nécessaires afin de détecter ces défaillances et de permettre leur réparation lors des opérations programmées. Il en résulte la

distribution de probabilité de défaillance illustrée à la figure II-12, et sa disponibilité moyenne est donnée par l'équation (II-14) (Andrews et Lunt, 2012; Andrews et Moss, 2002; Villemeur, 1988). Le temps de l'indisponibilité du système correspond à la somme du délai de détection de la panne et du temps nécessaire pour sa réparation.

$$Q_{AV} = \frac{1}{\theta} \int_0^{\theta} (1 - e^{-\lambda t}) dt \quad (\text{II-14})$$

Où, θ c'est l'intervalle entre les inspections, et Q_{AV} l'indisponibilité moyenne (Average)

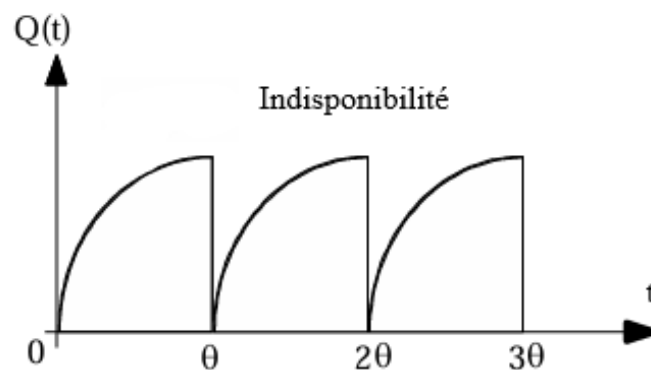


Figure II-12 L'indisponibilité d'un composant en attente (standby) (Andrews et Lunt, 2012)

II-7-3- Calcul de la probabilité de l'événement sommet

Calculer la probabilité de l'événement non désiré, ou l'événement sommet (principal), est une tâche fondamentale dans l'analyse quantitative, aussi appelée indisponibilité du système. Plusieurs méthodes de calcul sont utilisées, chaque approche nécessite d'identifier toutes les coupes minimales lors de l'analyse qualitative.

II-7-3-1- La méthode de la fonction de structure

Étant donné que la fonction de structure $\Phi(x)$ définit l'état du système, elle peut être utilisée pour calculer la probabilité de l'événement indésirable ou l'événement sommet (*Top event*). Il est également possible d'exprimer la fonction de structure en fonction des fonctions des structures de ses coupes minimales, C_i , $i = 1, \dots, n$:

La fonction de structure est alors donnée par l'équation (II-16)

$$\Phi(x) = 1 - \prod_{i=1}^{nc} (1 - \rho_i) \quad (\text{II-16})$$

Où, ρ_i est la fonction de structure pour chaque coupe minimale (Beeson, 2002; Sinnamon, 1996).

Si toutes les coupes minimales sont indépendantes, la probabilité de l'événement principale est obtenue en calculant l'espérance mathématique de la fonction de structure. Ainsi l'indisponibilité du système Q_{sys} est donnée par l'équation (II-17)

$$Q_{sys} = E [\Phi(x)] \quad (\text{II-17})$$

Puisque toutes les coupes minimales sont indépendantes, donc $E [\Phi(x)] = \Phi [E(x)]$

Remarque :

L'indépendance des coupes minimales implique que chacune d'elles constitue un ensemble d'événements dont la survenue est statistiquement indépendante des événements constituant les autres coupes minimales. Autrement dit, la probabilité d'apparition d'une coupe minimale donnée ne dépend pas de la réalisation ou non des autres coupes minimales. Cette hypothèse d'indépendance est essentielle pour simplifier les calculs probabilistes dans l'analyse de fiabilité, puisqu'elle permet d'évaluer la probabilité de l'événement principal en combinant les contributions des différentes coupes minimales sans tenir compte des interférences ou corrélations potentielles entre elles.

Dans ce cas $P (C_1 \cup C_2 \cup \dots \cup C_n) = P (C_1) + P (C_2) + \dots + P (C_n)$.

Démonstration

Considérons l'arbre des défaillances de la figure II-9, dont l'équation de l'événement sommet est donnée par :

$$T = C + AB$$

De l'équation (II-16) la fonction de structure est exprimée comme suit :

$$\Phi(x) = 1 - \prod_{i=1}^{nc} (1 - \rho_i)$$

$$\Phi(x) = 1 - (1 - x_c) (1 - x_a x_b)$$

$$\Phi(x) = 1 - (1 - x_a x_b - x_c + x_c x_a x_b) = x_a x_b + x_c - x_c x_a x_b$$

Et si on suppose que la probabilité de défaillance de chaque composant est de 0.1, alors l'indisponibilité du système est donnée par l'équation (II- 17).

$$Q_{sys} = E [\Phi(x)] = E [x_a x_b] + E [x_c] - E [x_c x_a x_b]$$

$$Q_{sys} = 0.1.0.1 + 0.1 - 0.1.0.1.0.1 = 0.01 + 0.1 - 0.001 = 0.109$$

S'il existe une dépendance entre les coupes minimales, on utilise le théorème de Shannon.

II-7-3-2- Le théorème de Shannon

Le théorème de Shannon (Shannon, 1949) est utilisé pour calculer la probabilité de l'événement sommet en présence de dépendances entre les coupes minimales ou en cas d'événements répétés. Il est formulé par l'équation (II-18) (Vesely et al., 1981).

$$\Phi(x) = x_i \Phi(1_i, x) + \bar{x}_i \Phi(0_i, x) \quad (II-18)$$

Où :

$$\bar{x}_i = 1 - x_i \text{ (La négation de } x_i \text{)}$$

$x = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \in \{0,1\}^n$ est le vecteur des états des événements de base.

$$\Phi(1_i, x) = \Phi(x_1, \dots, x_{i-1}, 1, x_{i+1}, \dots, x_n)$$

$$\Phi(0_i, x) = \Phi(x_1, \dots, x_{i-1}, 0, x_{i+1}, \dots, x_n)$$

$\Phi(1_i, x)$ et $\Phi(0_i, x)$ sont les résidus de $\Phi(x)$.

$\Phi(1_i, x)$ est la fonction de structure en fixant $x_i = 1$

$\Phi(0_i, x)$ est la fonction de structure en fixant $x_i = 0$

Cette relation est également connue, dans la littérature, sous différentes appellations : formule de Shannon, méthode de Shannon, développement de Shannon, ou encore la formule de factorisation, (Beeson, 2002; Limnios, 2013; Vesely et al., 1981)

De l'équation (II-17), on a

$$Q_{sys} = E [\Phi(x)]$$

Notons l'indisponibilité d'un composant i : q_i avec $q_i = E(x_i)$ et utilisons le théorème de Shannon dans l'équation (II-18).

$$Q_{sys} = q_i E [\Phi(1_i, q)] + (1 - q_i) E [\Phi(0_i, q)] \quad (II-19)$$

Exemple : prenons le cas d'une fonction de structure avec des événements de base qui se répètent et notons l'événement principal « T ».

$$T = ab + bc + ac$$

En appliquant l'équation (II-16)

$$\Phi(x) = 1 - (1 - x_a x_b) (1 - x_b x_c) (1 - x_a x_c)$$

En présence d'événements répétés, la fonction de structure est développée à l'aide du théorème de Shannon. Dans ce cas, on observe que les trois événements se répètent ; le développement de la fonction de structure s'effectue alors comme suit :

$$Q_{sys} = \{q_a \cdot q_b \cdot q_c E [\Phi(1.1.1)]\} + \{q_a \cdot q_b \cdot (1 - q_c) E [\Phi(1.1.0)]\} + \{q_a \cdot (1 - q_b) \cdot q_c E [\Phi(1.0.1)]\} \\ + \{q_a \cdot (1 - q_b) (1 - q_c) E [\Phi(1.0.0)]\} + \{(1 - q_a) \cdot q_b \cdot q_c E [\Phi(0.1.1)]\} + \{(1 - q_a) \cdot q_b \cdot (1 - q_c) E [\Phi(0.1.0)]\} \\ + \{(1 - q_a) \cdot (1 - q_b) \cdot q_c E [\Phi(0.1.0)]\} + \{(1 - q_a) (1 - q_b) (1 - q_c) E [\Phi(0.0.0)]\}.$$

Si, on pose $q_a = q_b = q_c = 0.1$

$$Q_{sys} = 0.1.0.1.0.1 (1) + 0.1.0.1.0.9 (1) + 0.1.0.9.0.1 (1) + 0.1.0.9.0.9 (0) + 0.9.0.1.0.1(1) + \\ 0.9.0.1.0.9 (0) + 0.9.0.9.0.1(0) + 0.9.0.9.0.9(0).$$

$$Q_{sys} = 0.028$$

Traçons la table de vérité de $\Phi(x)$ pour $x = 3$. Dans ce cas, le nombre total de combinaisons possibles est $2^3 = 8$.

Tableau II-2 La table de vérité de $\Phi(x)$.

x_a	x_b	x_c	$\Phi(x)$
1	1	1	1
1	1	0	1
1	0	1	1
1	0	0	0
0	1	1	1
0	1	0	0
0	0	1	0
0	0	0	0

Ainsi, le développement de Shannon est utilisé pour développer la fonction de structure par rapport à l'événement le plus répété jusqu'à ce que toutes les puissances de variables indicatrices (les x_i) dans les résidus soient éliminées.

Comparaison avec la méthode de la fonction de structure

$$\Phi(x) = 1 - (1 - x_a x_b) (1 - x_b x_c) (1 - x_a x_c)$$

$$\Phi(x) = 0.0297$$

La méthode de la fonction de structure fournit des valeurs biaisées pour des arbres des défaillances comportant des événements de base dépendants ou répétés.

II-7-3-3- La méthode du développement d'inclusion –exclusion

Le développement par inclusion-exclusion est couramment utilisé pour calculer la probabilité de l'événement principal ou indésirable. Cette méthode donne des résultats corrects pour les arbres des défaillances comportant des événements répétés, à condition que l'hypothèse d'indépendance des événements de base soit respectée (Andrews et Moss, 2002; Beeson, 2002; Hurdle, 2008; Limnios, 2013; Sinnamon, 1996; Tao, 2010).

Considérons un arbre des défaillances avec n coupes minimales, C_i , avec $i = 1, 2, \dots, n$

L'événement principal « T » existe si au moins une coupe minimale existe

$$T = C_1 + C_2 + \dots + C_n \quad (\text{II-20})$$

$$T = \bigcup_{i=1}^n C_i$$

La probabilité de l'événement indésirable est calculée par :

$$P(T) = P(C_1 + C_2 + \dots + C_n) = P(\bigcup_{i=1}^n C_i) = Q_{sys} \quad (\text{II-21})$$

Le développement de ce résultat donne le développement de l'inclusion- exclusion :

$$Q_{sys} = \sum_{i=1}^n P(C_i) - \sum_{i=2}^n \sum_{j=1}^{i-1} P(C_i \cap C_j) + \dots + (-1)^{n-1} P(C_1 \cap C_2 \cap \dots \cap C_n) \quad (\text{II-22})$$

Et si ce développement est évalué intégralement pour tout arbre des défaillances cohérent, il génère la probabilité exacte de l'événement sommet (indésirable).

Exemple, reprenons l'exemple précédent, $T = ab + bc + ac$

$$P(T) = Q_{sys} = P(a.b + b.c + a.c)$$

Il y a trois coupes minimales : $C_1 = a.b$, $C_2 = b.c$ et $C_3 = a.c$

Le développement de l'inclusion-exclusion donne la probabilité de « T » comme suit.

$$Q_{sys} = [P(a.b) + P(b.c) + P(a.c)] - [P(a.b.c) + P(a.b.c) + P(a.b.c)] + P(a.b.c)$$

$$Q_{sys} = q_a q_b + q_b q_c + q_a q_c - q_a q_b q_c - q_a q_b q_c - q_a q_b q_c + q_a q_b q_c$$

$$Q_{sys} = 0.028$$

On obtient le même résultat qu'avec le développement de Shannon, mais la méthode d'inclusion-exclusion est généralement plus rapide. Toutefois, ces deux approches restent globalement lourdes sur le plan des calculs. En effet, même si l'inclusion-exclusion est beaucoup plus efficace que le développement de Shannon, elle devient très coûteuse en temps de calcul lorsque l'arbre des défaillances est complexe et comporte un grand nombre de coupes minimales, parfois des centaines, voire des milliers. Dans ce cas, même l'utilisation de logiciels

spécialisés peut exiger un temps considérable. C'est pourquoi le recours à des méthodes approximatives s'avère mieux adapté.

II-7-3-4- Les méthodes approximatives

Il existe trois méthodes approximatives pour calculer la probabilité de l'événement principal (Top event) : L'approximation des événements rares ou la borne supérieure (The rare event approximation), L'approximation de la borne inférieure (The lower bound approximation), et la borne supérieure des coupes minimales (The minimal cut set upper bound) (Andrews et Moss, 2002; Beeson, 2002; Hurdle, 2008).

1-L'approximation des événements rares

L'approximation dite *des événements rares* ou la borne supérieure constitue la méthode la plus simple pour estimer la probabilité de l'événement maximal. Elle repose uniquement sur le premier terme du développement par inclusion-exclusion, ce qui en fait une approche particulièrement légère sur le plan computationnel. Bien que cette approximation ne prenne pas en compte les termes d'ordre supérieur, elle fournit une borne supérieure de la probabilité recherchée. Grâce à sa simplicité et à sa rapidité d'exécution, elle est largement utilisée dans l'analyse de fiabilité, en particulier lorsque le système étudié présente un grand nombre de coupes minimales et que le calcul exact devient trop coûteux.

$$Q_{sys} \leq \sum_{i=1}^n P(C_i) \quad (II-23)$$

Le nom « approximation des événements rares » ou « la limite supérieure des événements rares » provient du fait que cette estimation n'est réellement précise que lorsque les probabilités de défaillance des composants sont faibles.

2 - La borne inférieure

La borne inférieure de la probabilité de l'événement sommet est obtenue en approximant le développement par inclusion-exclusion à l'aide des deux premiers termes. L'augmentation du nombre de termes considérés dans l'expansion améliore la précision de l'approximation (Andrews et Moss, 2002; Beeson, 2002; Hurdle, 2008).

$$\sum_{i=1}^n P(c_i) - \sum_{i=2}^n \sum_{j=1}^{i-1} P(C_i \cap C_j) \leq Q_{sys}(t) \quad (II-24)$$

Ainsi, l'indisponibilité exacte du système est encadrée par la borne inférieure et la borne supérieure obtenues à partir du développement par inclusion-exclusion.

$$\sum_{i=1}^n P(c_i) - \sum_{i=2}^n \sum_{j=1}^{i-1} P(C_i \cap C_j) \leq Q_{sys}(t) \leq \sum_{i=1}^n P(C_i) \quad (II-25)$$

3-La borne supérieure des coupes minimales

La borne supérieure associée à l'ensemble de coupes minimales constitue une estimation plus précise que l'approximation des événements rares. En effet, si toutes les coupes minimales sont indépendantes, cette borne supérieure permet de calculer exactement la probabilité de l'événement sommet. Elle est obtenue selon le développement suivant :

La défaillance du système survient dès lors qu'au moins une coupe minimale se réalise :

$P(\text{de la défaillance du système}) = P(T) = P(\text{qu'au moins une coupe minimale existe})$

$$P(T) = 1 - (\text{aucune coupe minimale ne s'est réalisée})$$

$$P(\text{aucune coupe minimale ne s'est réalisée}) = P(\overline{C_1}, \overline{C_2}, \dots, \overline{C_n})$$

$$P(\text{aucune coupe minimale ne s'est réalisée}) = P\{(1 - C_1), (1 - C_2), \dots, (1 - C_n)\}$$

$$P(\text{aucune coupe minimale ne s'est réalisée}) \geq \prod_{i=1}^n P(C_i \text{ n'est pas réalisée})$$

Et

$$P(T) \leq 1 - \prod_{i=1}^n P(C_i \text{ n'est pas réalisée})$$

Ainsi la probabilité associée à la borne supérieure des coupes minimales s'exprime par l'équation (II-26) (Andrews et Moss, 2002; Beeson, 2002; Hurdle, 2008) :

$$Q_{sys}(t) \leq 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P(C_i)) \quad (II-26)$$

La probabilité exacte de l'événement sommet est encadrée par ses approximations, conformément à l'inéquation suivante :

$$\sum_{i=1}^n P(c_i) - \sum_{i=2}^n \sum_{j=1}^{i-1} P(C_i \cap C_j) \leq Q_{sys}(t) \leq 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P(C_i)) \leq \sum_{i=1}^n P(C_i) \quad (II-27)$$

On considère l'exemple précédent : $T = ab + bc + ac$

On trouve :

La borne inférieure = 0.0270

La borne supérieure des coupes minimales = 0.0297

L'approximation des événements rares = 0.0300

$$\text{Et} \quad 0.0270 \leq Q_{sys}(t) \leq 0.0297 \leq 0.0300$$

II-7-3-5- La méthode du diagramme de décision binaire

Les méthodes précédentes de calcul de la probabilité de l'événement principal reposent sur l'hypothèse que les probabilités des événements de base sont suffisamment faibles afin de minimiser l'erreur. Lorsque cette condition n'est pas remplie, ces méthodes peuvent conduire à d'importantes inexactitudes. Ces limites peuvent être dépassées grâce à l'approche des diagrammes de décision binaires (BDD). En effet, la méthode BDD convertit l'arbre des défaillances en une représentation encodant la décomposition de Shannon, ce qui permet de déterminer la probabilité exacte de défaillance au moyen d'une procédure de calcul particulièrement efficace (Andrews et Moss, 2002; Beeson, 2002; Sinnamon, 1996).

Brève explication des diagrammes de décision binaires

Un diagramme de décision binaire (BDD, Binary Decision Diagram) est une structure de données en forme de graphe orienté acyclique qui représente de manière compacte une fonction booléenne. Chaque nœud interne correspond à une variable binaire, avec deux branches indiquant les valeurs possibles (0 ou 1). Les nœuds terminaux indiquent le résultat de la fonction (vrai ou faux). En fiabilité, les BDD sont utilisés pour transformer un arbre des défaillances en une représentation canonique, ce qui permet de calculer efficacement la probabilité exacte de défaillance du système (Beeson, 2002; Imakhlaf, 2021; Sinnamon, 1996).

La conversion d'un arbre de défaillance (ADD) en diagramme de décision binaire (BDD) s'effectue à partir de la fonction de structure associée à l'ADD, laquelle constitue la base de sa

représentation logique. En effet, la fonction de structure exprime l'état du système en fonction des états de ses composants élémentaires. Cette représentation booléenne permet ensuite l'application de la décomposition de Shannon, qui est au cœur de la construction du BDD et garantit une modélisation exacte et non redondante du comportement du système.

Considérant l'exemple suivant :

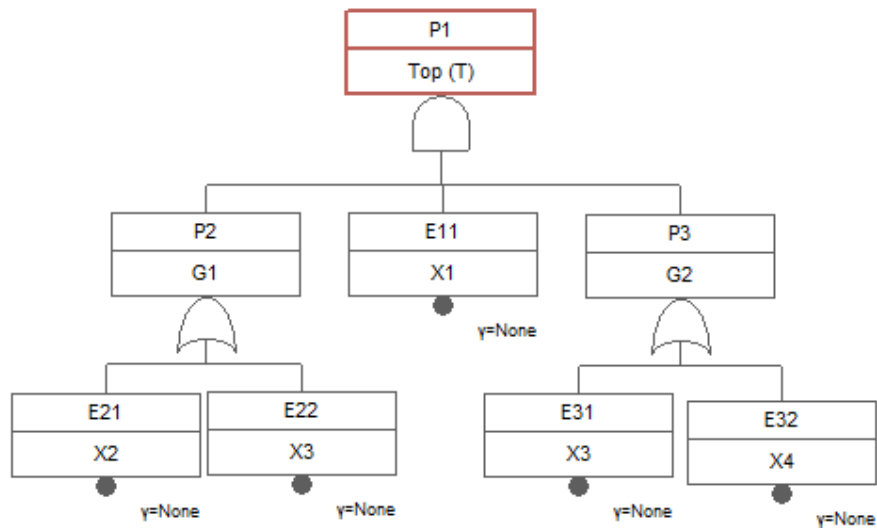


Figure II-13 Exemple d'arbre des défaillances

Traçons son BDD équivalent

Utilisant la fonction de structure de l'arbre des défaillances de la figure II-13 :

Suivant l'équation II-20. L'événement principal existe si une coupe minimale existe pour l'ADD.

$$T = G_1 \cdot G_2 \cdot X_1$$

$$T = (X_1 X_2 X_4) + (X_1 X_3)$$

Sa fonction de structure suivant l'équation II-16

$$\Phi(x) = 1 - (1 - X_1 X_2 X_4) (1 - X_1 X_3)$$

De cette fonction de structure, le BDD est réalisé. Il suffit de prendre l'ordre descendant, de gauche à droite des événements fondamentaux $X_1 < X_2 < X_3 < X_4$ et tous les arcs de gauche partant de chaque nœud sont les arcs à 1 et tous les arcs de droite sont les arcs à 0.

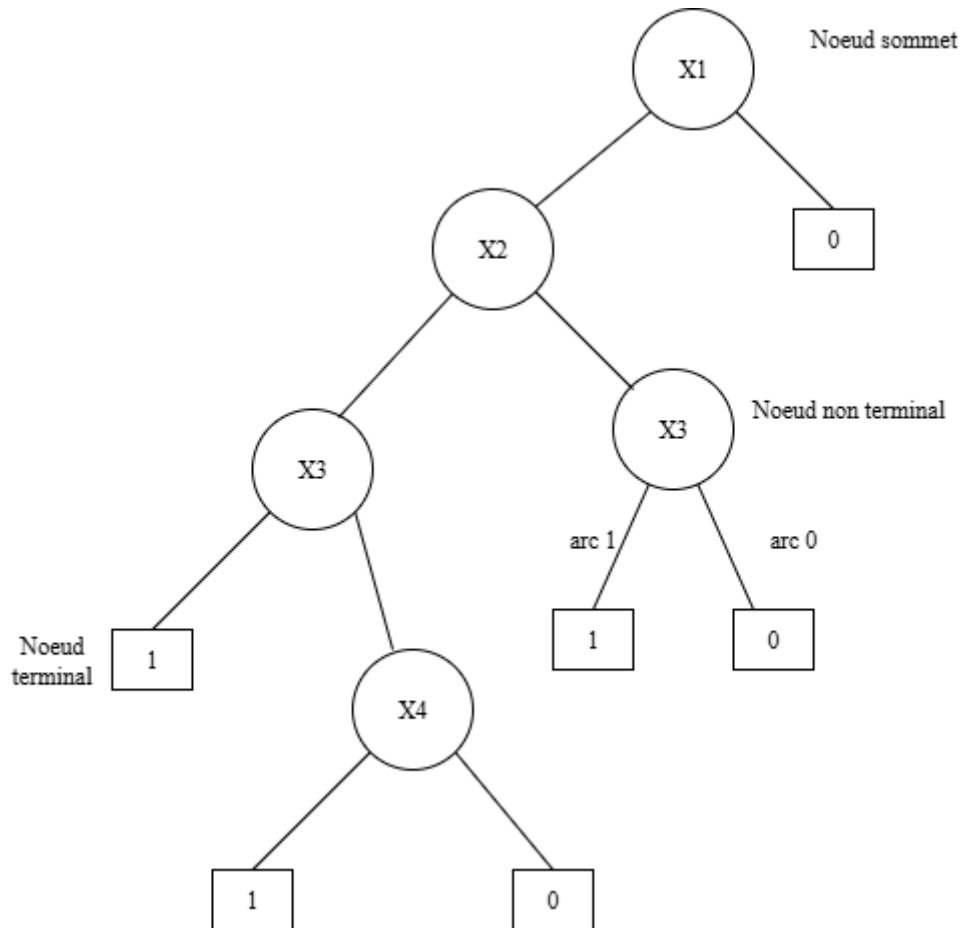


Figure II-14 Le diagramme de décision binaire correspondant à l'ADD de la figure II-13

Chaque coupe commence à partir du nœud sommet et descend à travers le diagramme jusqu'aux nœuds terminaux. Seuls les nœuds situés sur un arc à 1 menant à un nœud terminal à 1 sont inclus dans une coupe. Les coupes à travers un BDD, construites pour un arbre des défaillances particulier, correspondent aux ensembles de coupes de cet arbre des défaillances. Pour le BDD de la figure II-14, les coupes minimales sont :

- 1- $X_1 X_2 X_3$
- 2- $X_1 X_2 \bar{X}_3 X_4$
- 3- $X_1 \bar{X}_2 X_3$

Avec $\bar{X} = 1 - X$

La probabilité de l'événement principal est obtenue en sommant les probabilités des différentes coupes minimales.

$$Q_{sys} = P (X_1 X_2 X_3 + X_1 X_2 \bar{X}_3 X_4 + X_1 \bar{X}_2 X_3)$$

$$Q_{sys} = q_{X_1} \cdot q_{X_2} \cdot q_{X_3} + q_{X_1} \cdot q_{X_2} \cdot (1 - q_{X_3}) \cdot q_{X_4} + q_{X_1} \cdot (1 - q_{X_2}) \cdot q_{X_3}$$

Si on pose $q_{X_1} = 0.01$, $q_{X_2} = 0.02$, $q_{X_3} = 0.03$ et $q_{X_4} = 0.04$

$$Q_{sys} = 0.000006 + 0.00000776 + 0.000094 = 3.0776 \cdot 10^{-4}$$

Pour l'exemple précédent ou $T = ab + bc + ac$

Sa fonction de structure est : $\Phi(x) = 1 - (1 - x_a x_b) (1 - x_b x_c) (1 - x_a x_c)$

Si on prend l'ordre descendant, de gauche à droite des événements fondamentaux donnerais $X_a < X_b < X_c$ et le développement de Shannon, on obtiendra le BDD suivant de la figure II-15

$$\Phi_1(x_a = 1) = 1 - (1 - x_b) (1 - x_b x_c) (1 - x_c)$$

$$\Phi_1(x_a = 0) = 1 - (1) (1 - x_b x_c) (1 -) = x_b x_c$$

$$\Phi_2(x_b = 1) = 1$$

$$\Phi_2(x_b = 0) = x_c$$

$$\Phi_3(x_c = 1) = 1$$

$$\Phi_3(x_c = 0) = 0$$

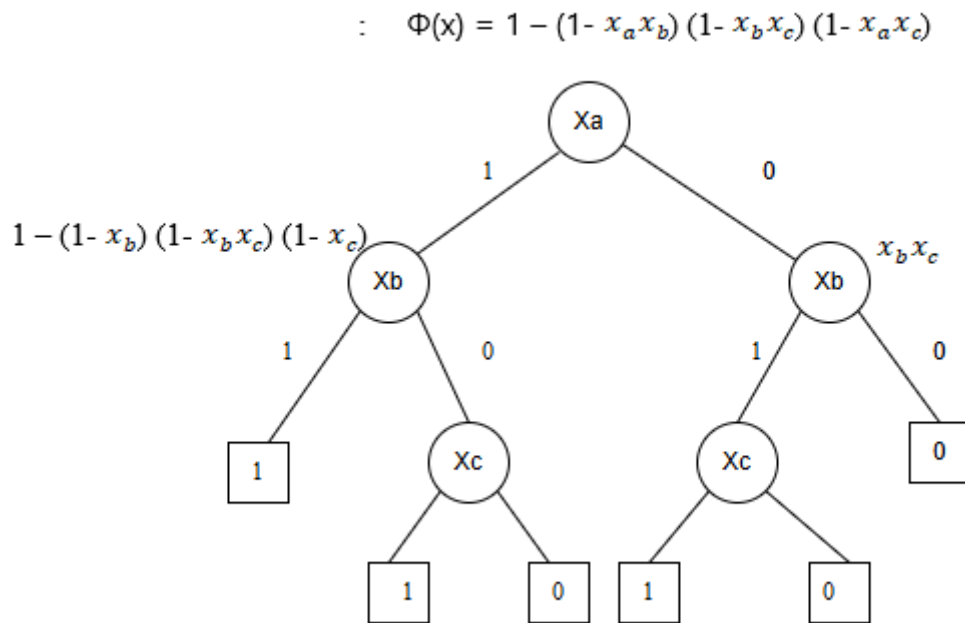


Figure II-15 Exemple d'un BDD du top event T

Calcul de la probabilité de l'événement sommet (Top event) en utilisant la méthode des BDD.

Les coupes minimales pour ce BDD sont :

1- $x_a x_b$

2- $x_a \overline{x_b} x_c$

3- $\overline{x_a} x_b x_c$

$$Q_{sys} = q_a q_b + q_a(1 - q_b) q_c + (1 - q_a) q_b q_c$$

Si on prend la même hypothèse que précédemment : $q_a = q_b = q_c = 0.1$

$$\text{Alors } Q_{sys} = 0.1.0.1 + 0.1.0.9.0.1 + 0.9.0.1.0.1 = 0.028$$

C'est la probabilité exacte de l'apparition de l'événement sommet.

II-7-4- Les facteurs d'importance

Une fois que la probabilité de la défaillance du système est calculée, c'est-à-dire son indisponibilité à un instant t ou sa fiabilité sur un intervalle $[0, t]$. Une question cruciale se pose : quel composant, quelle coupe minimale ou quel sous-système est à l'origine de cette défaillance ? Autrement dit, comment l'indisponibilité q d'un composant ou sa fiabilité r peuvent-elles contribuer à l'apparition de l'événement sommet ?

La réponse à cette interrogation se trouve dans le calcul des facteurs d'importance. Ces facteurs d'importance jouent un rôle fondamental dans l'analyse quantitative du système, car ils permettent à l'analyste de hiérarchiser la contribution de chaque composant à la survenue de l'événement principal. Grâce à cette méthode, les points faibles du système peuvent être identifiés, ce qui ouvre la voie à des modifications ciblées susceptibles d'améliorer la fiabilité globale du système.

En analyse de fiabilité, un système est défini comme un ensemble de composants interconnectés dont l'interaction assure une fonction spécifique, et dont la performance globale dépend de l'état de fonctionnement de ses éléments constitutifs. Certains composants contribuent de manière plus déterminante que d'autres à l'apparition de l'événement principal.

Birnbaum fut le premier à introduire le concept de facteur d'importance en 1968 (Beeson, 2002; Birnbaum, 1968). Il a mis en évidence l'intérêt de quantifier la contribution de chaque composant ou événement de base afin de refléter la sensibilité du système à leur défaillance. Les mesures d'importance attribuent à chaque composant (ou coupe minimale) une valeur

comprise entre 0 et 1, où 1 correspond à la contribution maximale et 0 à une absence d'influence.

De nombreuses mesures d'importance ont été développées pour évaluer les différents rôles qu'une défaillance de composant peut jouer dans la dégradation de l'état du système. Chacune de ces mesures apporte une information spécifique sur le système et ses composants. Il est donc essentiel, d'une part, de sélectionner les mesures d'importance les plus adaptées aux objectifs de l'analyse et, d'autre part, de savoir interpréter correctement les résultats obtenues. Ces mesures peuvent être classées en deux grandes catégories : déterministes et probabilistes (Andrews et Moss, 2002; Beeson, 2002; Hurdle, 2008).

II-7-4-1- Les facteurs d'importance déterministes

Ces facteurs, également appelés mesures d'importance structurelle (*Structural Measures of Importance*), permettent d'évaluer l'importance des composants ou des coupes minimales sans prendre en compte leur fiabilité. Elles sont particulièrement utiles au début de la phase de conception du système, lorsque les informations relatives aux probabilités de défaillance des composants sont encore limitées (Andrews et Moss, 2002; Beeson, 2002; Hurdle, 2008; Limnios, 2013).

Birnbaum a introduit une mesure d'importance structurelle, qui permet d'évaluer quantitativement la contribution de chaque composant au fonctionnement global du système.

$$I_i (\Phi) = \frac{\text{nombre d'états critiques pour le composant } i}{\text{le nombre totale d'états des } (n-1)\text{ composants restant}} \quad (\text{II-27})$$

Pour illustrer le calcul de cette mesure, considérons le système défini par l'événement sommet $T = ab + bc + ac$ et déterminons le facteur d'importance structurelle des composants.

La fonction de structure de ce système est donnée par :

$$\Phi(x) = 1 - (1 - x_a x_b) (1 - x_b x_c) (1 - x_a x_c)$$

Dans un premier temps, il convient d'énumérer l'ensemble des états possibles des composants « b » et « c ». Ensuite, il faut identifier les configurations dans lesquelles le composant « a » est critique, c'est-à-dire celles où son état conditionne directement le fonctionnement ou la défaillance du système (Andrews et Moss, 2002; Beeson, 2002).

Les tableaux suivants illustrent les différents états du système en fonction des états de ses composants.

Tableau 1 le composant a

x_b	x_c	$\Phi(x)$
0	0	0
0	1	x_a
1	0	x_a
1	1	1

Tableau 2 le composant b

x_a	x_c	$\Phi(x)$
0	0	1
0	1	x_b
1	0	x_b
1	1	0

Tableau 3 le composant c

x_a	x_b	$\Phi(x)$
0	0	1
0	1	x_c
1	0	x_c
1	1	0

Et en utilisant l'équation (II-27), on obtient pour le composant « a », la probabilité suivante :

$$I_a(\Phi) = \frac{2}{4} = \frac{1}{2} = I_b(\Phi) = I_c(\Phi)$$

Le composant « a » présente deux états critiques, tout comme les composants « b et c ». Par conséquent, chacun de ces éléments exerce une influence structurelle équivalente sur le fonctionnement global du système.

En pratique, les analyses de fiabilité recourent principalement aux facteurs d'importance probabilistes, ceux-ci offrant une évaluation plus fine et plus pertinente de l'influence des composants sur le comportement global du système.

II-7-4-2- Les facteurs d'importance probabilistes

Divers facteurs d'importance peuvent être employés pour identifier les composants ou les coupes minimales ayant une contribution significative à la défaillance du système. Dans le cadre de ce chapitre, seuls les facteurs les plus couramment utilisés seront présentés.

Ces facteurs d'importance intègrent explicitement la probabilité de défaillance des composants, ce qui leur confère une meilleure pertinence pour l'évaluation de l'influence réelle de chaque élément sur la fiabilité globale du système.

1- Le facteur d'importance de Birnbaum

Aussi désigné sous l'appellation « *facteur d'importance marginal* » (*Marginal Importance Factor*, MIF), ce concept a été formalisé par Birnbaum en 1968 (Birnbaum, 1968). Il constitue l'une des mesures fondamentales en analyse de fiabilité, car il permet d'évaluer l'influence directe d'un composant sur la probabilité de défaillance du système (Andrews et Lunt, 2012; Andrews et Moss, 2002; Beeson, 2002; Bicking et al., 2013; Limnios, 2013; Modarres, 2006; Sinnamon, 1996). Le facteur d'importance relatif au composant i peut s'écrire :

$$I_B(i; p) = \Pr \{ \Phi(\mathbf{x}) = 1 / x_i = 1 \} - \Pr \{ \Phi(\mathbf{x}) = 1 / x_i = 0 \} \quad (\text{II-58})$$

Le facteur d'importance marginal est défini à partir de la fonction de structure $\Phi(\mathbf{x})$, il peut être reformulé en fonction de l'indisponibilité du système $Q_{sys}(t)$, ce qui permet d'établir un lien direct entre la contribution d'un composant et la probabilité globale de défaillance du système.

$$I_i^B = \frac{\partial Q_{sys}(t)}{\partial q_i(t)} \quad (\text{II-29})$$

Ce qui donne l'équation suivante :

$$I_i^B = Q_{sys}(1_i, \mathbf{q}) - Q_{sys}(0_i, \mathbf{q}) \quad (\text{II-60})$$

Où, Q_{sys} désigne l'indisponibilité du système, $Q_{sys}(1_i, \mathbf{q})$ représente la probabilité que le système soit en panne lorsque le composant i est défaillant, tandis que $Q_{sys}(0_i, \mathbf{q})$ correspond à la probabilité que le système fonctionne quand le composant i est opérationnel.

2- Le facteur d'importance critique

Le facteur d'importance critique (Criticality Importance Factor, CIF) a été introduit par Lambert en 1975. Il correspond à la probabilité qu'un composant i soit en état de fonctionnement et qu'il soit critique pour le fonctionnement du système, sachant que ce dernier est opérationnel, son expression est donnée par l'équation (II-31) (Andrews et Lunt, 2012; Andrews et Moss, 2002; Beeson, 2002; Bicking et al., 2013; Lambert, 1975; Limnios, 2013; Modarres, 2006; Sinnamon, 1996).

$$I_i^C = \frac{I_i^B q_i(t)}{Q_{sys}(t)} \quad (\text{II-31})$$

Ce facteur mesure l'importance d'un composant en fonction de sa contribution à la défaillance du système. Il constitue un outil d'aide à la décision en situation de panne, en permettant de hiérarchiser les composants à réparer en priorité afin de restaurer le fonctionnement global.

3- Le facteur d'importance de Fussell-Vesely

Introduit par Fussell et Vesely, ce facteur d'importance, également désigné sous le nom de facteur d'importance de diagnostic (Diagnostic Importance Factor, DIF), est utilisé pour la classification des coupes minimales, il représente la probabilité qu'au moins une coupe minimale inclue le composant i . Son expression est donnée par l'équation (II-32).

$$I_i^{FV} = \frac{P[\cup_{k=1, i \in C_k}^n C_k]}{Q_{sys}(t)} \quad (II-32)$$

Où

$P[\cup_{k=1, i \in C_k}^n C_k]$ = est la probabilité de l'union de toutes les coupes minimales du système

C_k = l'ensemble des coupes minimales

4-Le facteur de diminution du risque

Le facteur de diminution du risque (Reliability Reduction Worth, RRW) évalue les dommages causés au système par le composant i . Il représente la diminution maximale du risque que l'on peut espérer en améliorant la fiabilité du composant i . L'équation suivante donne l'expression du RRW.

$$I_{RRW}(i, p) = \frac{Q_{sys}(1_i)}{Q_{sys}(0_i)} \quad (II-33)$$

Avec :

$Q_{sys}(1_i)$ = La probabilité de défaillance du système lorsque le composant i est défaillant

$Q_{sys}(0_i)$ = La probabilité de défaillance du système lorsque le composant i est en fonctionnement.

Ce facteur est essentiel pour identifier les composants dont l'amélioration de la fiabilité aurait l'impact le plus significatif sur la fiabilité du système.

- ✓ Si $RRW_i = 1$, la défaillance du composant i n'a **aucune influence** sur le comportement global du système.
- ✓ Si $RRW_i > 1$, la défaillance du composant i **augmente la probabilité de défaillance du système**, proportionnellement à la valeur du RRW .

Un RRW élevé indique donc un **composant critique**, dont la défaillance impacte fortement la disponibilité du système.

5-Le facteur d'augmentation du risque

Le facteur d'augmentation du risque (Risk Achievement Worth, RAW) évalue l'effet de la défaillance certaine d'un composant sur la probabilité de défaillance globale du système. Il permet d'estimer à quel point la défaillance d'un composant unique pourrait compromettre la performance ou la sûreté du système. L'équation suivante donne l'expression du RAW.

$$I_{RAW} = \frac{Q_{sys}(1_i)}{Q_{sys}} \quad (II-34)$$

Avec :

$Q_{sys}(1_i)$ = La probabilité de défaillance du système lorsque le composant i est considéré comme certainement défaillant ($q_i = 1$).

Q_{sys} = la probabilité de défaillance du système.

Ce facteur quantifie l'accroissement maximum de la fiabilité du système généré par le composant i .

- ✓ $RAW_i = 1$, la défaillance du composant i n'affecte pas la probabilité de défaillance globale du système.
- ✓ $RAW_i > 1$, la panne du composant i entraîne une augmentation de la probabilité de défaillance du système.

Plus la valeur de RAW_i est élevée, plus le composant est important pour la sûreté et la disponibilité du système. Ainsi, le facteur d'augmentation du risque met en évidence les composants dont la défaillance rend le système **hautement vulnérable**. Le tableau II-3 résume les principaux facteurs d'importance.

Tableau II-3 Résumé des principaux facteurs d'importance

Mesure d'importance	Signification principale	Expression mathématique
Birnbaum (B_i)	Sensibilité du système à l'état du composant i	$I_i^B = \frac{\partial Q_{sys}(t)}{\partial q_i(t)}$
Criticality Importance Factor (CIF)	Contribution absolue d'un composant i à la probabilité de défaillance du système	$I_i^C = \frac{I_i^B q_i(t)}{Q_{sys}(t)}$
Fussell- Vesely (FVi)	Contribution relative à la défaillance du système.	$I_i^{FV} = \frac{P[\cup_{k=1, i \in C_k}^n C_k]}{Q_{sys}(t)}$
Reliability Reduction Worth (RRWi)	Effet de la panne certaine du composant i	$I_{RRW}(i, p) = \frac{Q_{sys}(1_i)}{Q_{sys}(0_i)}$
Risk Achievement Worth (RAWi)	Augmentation du risque globale si le composant i est défaillant	$I_{RAW}(i, p) = \frac{Q_{sys}(1_i)}{Q_{sys}}$

II-8- Conclusion

La méthode des arbres de défaillances constitue un outil de modélisation hiérarchique incontournable pour l'analyse des systèmes complexes. Son champ d'application dépasse largement le domaine industriel et s'étend aujourd'hui à des secteurs variés tels que la médecine ou la finance. Elle permet d'établir un lien explicite entre l'événement indésirable principal et l'ensemble de ses causes potentielles, facilitant ainsi l'identification et l'évaluation des scénarios de risque.

Sa représentation arborescente confère à cette méthode une grande lisibilité, rendant son interprétation accessible même aux non-spécialistes. L'approche se décline en deux volets complémentaires : une analyse qualitative, qui fournit une vision globale de la vulnérabilité du système, et une analyse quantitative, qui permet une estimation précise de sa fiabilité et de sa sûreté de fonctionnement.

L'analyse qualitative d'un arbre des défaillances cohérent a pour objectif d'identifier toutes les coupes minimales, c'est-à-dire les plus petites combinaisons de composants dont la défaillance entraîne celle du système. L'analyse quantitative, quant à elle, s'appuie sur ces résultats pour calculer la probabilité de défaillance du système à partir des probabilités de

défaillances de ses composants, ou encore pour déterminer son indisponibilité sur une période donnée, estimer son intensité de défaillance et prévoir le nombre attendu de défaillances.

Le calcul de l'indisponibilité d'un système repose sur différentes méthodes. La fonction de structure est utilisée lorsque les coupes minimales sont indépendantes, tandis que le théorème de Shannon convient mieux en cas de dépendance entre événements de base. La méthode d'inclusion-exclusion s'applique aux événements répétés mais indépendants. Ces approches supposent des probabilités de défaillance faibles ; si cette condition n'est pas respectée, la méthode des diagrammes de décision binaire (BDD) est employée pour obtenir une estimation exacte. Enfin, l'analyse quantitative permet également d'identifier les composants les plus critiques grâce au calcul des facteurs d'importance. Dans la présente étude, les facteurs d'importance de Birnbaum et de Fussell-Vesely sont retenus.

L'analyse par arbre des défaillances est une méthode largement utilisée dans de nombreux secteurs, y compris les industries chimiques et pétrochimiques. Ces dernières transforment des matières premières en produits semi-finis destinés à d'autres unités de production, ou en produits finis directement consommés par les ménages. Au cœur de ces procédés se trouvent les réacteurs chimiques dont la conception est souvent complexe et peut inclure des boucles de régulation, des boucles de rétroaction ou des interactions particulières entre composants susceptibles de rendre le système non cohérent. L'étude de ces situations, ainsi que les méthodes d'analyse adaptées aux systèmes non-cohérents, fait l'objet du chapitre III.

Chapitre III

Les arbres des défaillances non-cohérents

Sommaire du chapitre III

III-1-Introduction	94
III-2-Les arbres des défaillances non-cohérents.....	95
III-3- Le modèle des arbres des défaillances non-cohérents	96
III-4- Des exemples d'arbres des défaillances non-cohérents.....	98
III-4- 1- Système à multitâches	98
III-4-2- Système à deux alimentations électriques.....	106
III-5- L'analyse qualitative.....	108
III-5-1- Les impliquant premiers	109
III-5-2- Le théorème du consensus.....	113
III-6- L'analyse quantitative.....	115
III-6-1- Les facteurs d'importance.....	116
1- Le facteur d'importance de Birnbaum	117
2- Le facteur d'importance de Fussell-Vesely.....	118
III-7-Conclusion.....	120

III-1-Introduction

La majorité des systèmes présentent une structure dite *cohérente* ; toutefois, certains systèmes se caractérisent par une structure non-cohérente, généralement induite par l'existence de boucles de rétroaction négative, de mécanismes de redondance complexes ou encore de séquences de commutations conditionnelles. L'existence et la problématique de ces systèmes ont été identifiées dès les années 1970. Contini et al. (2008), dans leur étude de référence intitulée « *On the use of non-coherent trees in safety and security studies* », rappellent que plusieurs auteurs ont signalé l'impossibilité de modéliser correctement ces systèmes au moyen d'arbres des défaillances cohérents (Contini et al., 2008).

Pour dépasser cette limitation, l'introduction de la porte logique Ou exclusive (XOR) a été proposée. Cette porte permet de représenter deux événements mutuellement exclusifs, la modélisation de l'un des deux pouvant être complétée par une porte logique NON (NOT), représentant sa négation. Contini et al. Rapportent que Fussell fut l'un des premiers à adopter cette approche dans la modélisation d'un système électrique à double interrupteur, dont la non-cohérence résultait des séquences de commutation.

La problématique de la non-cohérence a été illustrée de manière exemplaire par l'analyse du système de refroidissement d'un réacteur de synthèse d'acide nitrique menée par Lapp et Powers (1977). La présence de circuits de secours multiples et de dispositifs automatiques de basculement induisait des relations logiques contradictoires entre les événements de défaillance, rendant l'arbre non monotone (Lapp et Powers, 1977). Cet exemple demeure une référence majeure dans l'étude des structures non-cohérentes, comme en témoignent les travaux de Locks, Lambert et d'autres chercheurs (Contini et al., 2008).

Dans ce contexte, les arbres des défaillances non-cohérents constituent un cadre formel permettant de représenter fidèlement des architectures techniques où les interactions ne suivent pas un schéma monotone. Ils permettent notamment de modéliser des systèmes présentant des boucles de rétroaction négatives, des effets de redondances imparfaites ou des commutations dépendantes de l'état du système.

III-2-Les arbres des défaillances non-cohérents

Les arbres des défaillances cohérents reposent sur les portes logiques « OU » et « ET », et des variables monoformes représentant l'état défaillant des composants (x_i). Leur propriété

fondamentale est la monotonie : la probabilité de défaillance du système croît nécessairement avec celle des composants.

À l'inverse, les arbres des défaillances non-cohérents modélisent des systèmes dont la structure logique enfreint la monotonie, en raison de comportement tels que les boucles de régulation, des boucles de rétroaction négatives, les basculements automatiques, les actions de maintenance spécifiques, ou encore les imperfections des conceptions, etc. (Contini et al., 2008; Lapp et Powers, 1977; Limnios, 2013; Zhang et Mei, 1987; Ziani, 2007). Leur particularité réside dans l'intégration de portes logiques négatives telles que XOR, NAND ou NOR, ou encore dans l'utilisation explicite de la porte NOT

Dans ces modèles, les événements de base sont représentés par des variables biformes distinguant l'état défaillant (x_i) de l'état fonctionnel ($-x_i$). Ainsi, la défaillance du système peut dépendre non seulement d'un composant en panne mais également d'un composant en état de fonctionnement, ce qui traduit directement la non-monotonie de la fonction de structure.

De manière générale, les arbres des défaillances non-cohérents (ADD non-cohérents) se caractérisent par la transgression d'au moins une des deux conditions de cohérence, la monotonie et la pertinence définies dans la littérature. (Andrews, 2000; Andrews et Beeson, 2003; Beeson et Andrews, 2003; Beeson, 2002; Contini et al., 2008; Kostolny et al., 2014; Kvassay et al., 2017; Remenyte-Prescott et Andrews, 2008; Sharvia and Papadopoulos, 2008). Plus spécifiquement, la non-cohérence est établie lorsque la fonction de structure associée à l'arbre est non monotone, ce qui implique qu'un composant fonctionnel peut contribuer à la défaillance du système.

La figure III-1 illustre le principe de la non-cohérence d'un système vis-à-vis d'un composant donné. On y observe qu'une panne du composant i peut conduire au retour en fonctionnement du système, tandis que son bon état peut provoquer la défaillance du système.

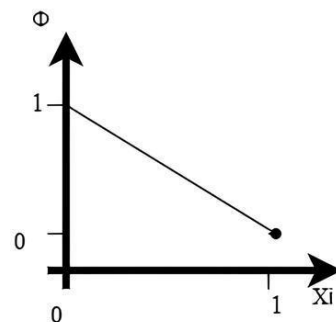


Figure III-1 La fonction de structure non-cohérente

III-3- le modèle des arbres des défaillances non-cohérents

Les arbres des défaillances non-cohérents ont historiquement suscité une réticence notable quant à leur adoption, en raison de trois limites conceptuelles majeures. Premièrement, l'introduction de la porte logique « NON » ou « NOT », appliqué à l'état d'un composant (x_i), c'est-à-dire l'apparition explicite de l'état ($-x_i$) ou ($\bar{x}$) rompt l'hypothèse fondamentale de monotocité des arbres cohérents. Dans un arbre cohérent la fonction de structure de l'événement principal est une fonction monotone croissante, ce qui signifie que la défaillance du système ne peut qu'augmenter lorsque l'état des composants s'aggrave vers un état défaillant (Beeson, 2002; Contini et al., 2008; Sharvia et Papadopoulos, 2008).

L'opérateur « NOT » introduit la relation inverse, rendant possible qu'un composant fonctionnel contribue à la défaillance du système, ce qui est interprété comme un problème de cohérence structurelle ou même une anomalie de conception. Pour cette raison, il était traditionnellement conseillé de modifier la conception plutôt que de modéliser explicitement ce comportement (Beeson, 2002; Contini et al., 2008; Sharvia et Papadopoulos, 2008).

Deuxièmement, la prise en compte des états fonctionnels dans la structure logique ne génère souvent aucune nouvelle information qualitative en sûreté de fonctionnement, car elle ne met pas nécessairement en évidence de nouvelles voies de défaillances pertinentes. Enfin troisièmement, la présence de la porte « NOT » augmente considérablement la complexité de l'analyse qualitative et quantitative rendant la modélisation, l'interprétation et le calcul des probabilités de défaillances plus difficiles (Andrews, 2000; Contini et al., 2008; Sharvia et Papadopoulos, 2008).

Un argument supplémentaire contre l'utilisation de la porte logique « NOT » dans un arbre des défaillances, repose sur le fait que la probabilité de l'événement contraire est généralement proche de 1. L'impact quantitatif des termes ($-x_i$) est donc considéré comme négligeable, sans perte significative de précision (Sharvia et Papadopoulos, 2008).

Malgré ces critiques, plusieurs auteurs soulignent que les systèmes non-cohérents existent réellement dans la pratique industrielle. Ainsi, Contini et al. (2008) et Sharvia et Papadopoulos (2008) présentent divers cas où l'usage de la porte « NOT » est indispensable pour représenter correctement le comportement logique du système. Parmi ces exemples figure l'exemple de Fussell évoqué en introduction, ainsi que celui de Lapp et Powers (1977).

Cependant, l'exemple le plus notable est celui présenté par Andrews (2000), concernant la modélisation de la défaillance du système multitâche qui souligne que l'utilisation de la porte logique « NOT » est particulièrement importante pour la modélisation de la défaillance du système. Ce problème est abondamment traité dans différents travaux consacrés aux arbres des défaillances non-cohérents et il est présenté comme un cas de référence (Andrews, 2000; Andrews et Beeson, 2003; Beeson, 2002; Contini et al., 2008; Sharvia et Papadopoulos, 2008; Tao, 2010).

Dans une perspective plus analytique, Hurdle (2008) montre que la transformation d'un arbre cohérent en un arbre non-cohérent via l'insertion de la porte « NOT », améliore non seulement la précision quantitative, mais accroît également la quantité d'information disponible sur le système (Hurdle, 2008; Hurdle et al., 2007).

Sharvia et Papadopoulos (2008) dans leur article intitulé « *Non-coherent modelling in computational fault tree* », évoquent à la fois les arguments contre et en faveur de l'utilisation des arbres des défaillances non-cohérents. Le premier argument, souvent avancé par les détracteurs de cette approche, repose sur l'idée que si l'on admet que l'état fonctionnel d'un composant peut entraîner la défaillance du système, il faut également accepter que la défaillance d'un composant puisse dans certains cas, empêcher la défaillance du système. Cette hypothèse est jugée peu réaliste. À titre d'exemple, les auteurs citent le *Fault Tree Handbook* (Vesely et al., 1981), qui considère que les situations dans lesquelles les défaillances des composants contribueraient « miraculeusement » à éviter la défaillance du système ne devraient pas être incluses dans les arbres des défaillances, car elles sont hautement improbables.

Cependant, Sharvia et Papadopoulos rapportent également l'argument contraire formulé par Johnston et Matthews (1983), qui souligne qu'il existe un intérêt majeur à inclure ces comportements non intuitifs, car ils peuvent mettre en évidence des mécanismes de sûreté insoupçonnés. L'exemple présenté s'appuie sur les formalisations suivantes :

Fuite d'huile = Tuyau endommagé (1)

Fuite d'huile = Tuyau endommagé, et (– Défaillance de l'alimentation en huile) (2)

L'exemple (1), correspondant à un état cohérent, traduit une situation dans laquelle le tuyau est endommagé. Dans ce cas, les actions de maintenance peuvent être limitées au remplacement ou à la réparation du tuyau défectueux. En revanche, l'exemple (2), illustre un état non cohérent

où la fuite d'huile résulte de l'endommagement du tuyau, tandis que le système d'alimentation en huile demeure opérationnel (– Défaillance de l'alimentation en huile). Cette configuration met en évidence une incohérence fonctionnelle susceptible d'entraîner des risques supplémentaires, notamment la perte continue d'huile. Elle suggère ainsi la nécessité d'intégrer, dès la phase de conception, un dispositif automatique de coupure de l'alimentation en huile afin de prévenir toute aggravation de la défaillance.

III-4- Des exemples d'arbres des défaillances non-cohérents

Les exemples présentés dans cette section démontrent que, dans certaines circonstances, l'utilisation de la porte logique « NOT » dans la modélisation du système à l'aide d'un arbre des défaillances s'avère essentielle et pertinente, car elle permet d'obtenir une analyse plus précise et plus représentative du comportement réel du système.

III-4- 1- Système à multitâches

Ce système, proposé par Andrews (2000) dans son article « *To Not or Not to Not !!* » et repris par de nombreux auteurs et chercheurs. Il a suscité un vif intérêt en raison de son caractère non cohérent. L'analyse de ce système constitue un excellent moyen de mettre en évidence l'importance de la porte logique « NOT » afin de mieux modéliser les systèmes présentant un comportement non-cohérent.

Dans notre étude, nous avons modélisé ce système à l'aide d'un arbre des défaillances cohérent et nous l'avons analysé avec le logiciel « *Arbre Analyst* ». Toutefois aucun résultat n'a pu être obtenu, le logiciel n'a pas été en mesure de calculer la probabilité de défaillance du système. La représentation de ce système est illustrée à la figure III-2

Il s'agit d'un système multitâche équipé de deux capteurs de gaz, D1 et D2, qui servent à détecter les fuites dans un espace confiné. Les détecteurs envoient des signaux via des câbles individuels à l'unité de commande logique de l'ordinateur, LU. Si la LU reçoit un signal indiquant une fuite de gaz provenant d'un capteur, trois fonctions doivent être exécutées.

1- Arrêt du processus : mettre hors tension le relais R1.

2- Informer l'opérateur de la fuite à l'aide d'un voyant lumineux et d'une sirène marqués L.

3- Couper l'alimentation électrique des zones concernées : mettre hors tension le relais R2.

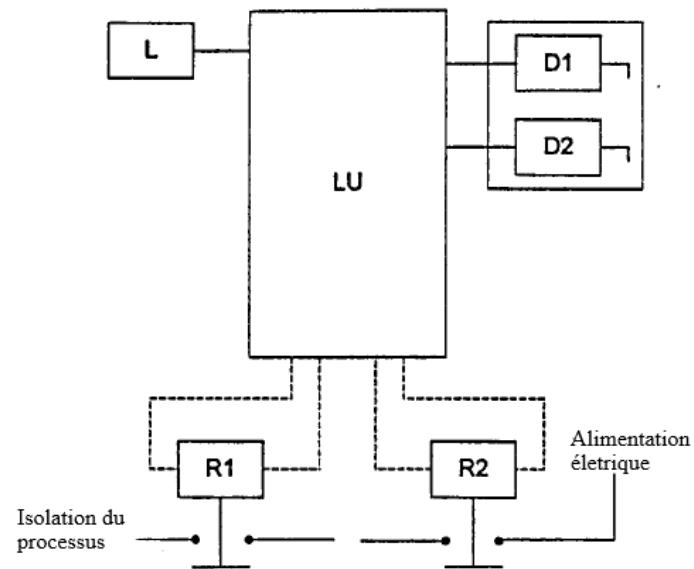


Figure III-2 Le système multitâche (Beeson, 2002).

Le système est considéré comme défaillant s'il ne remplit pas une ou plusieurs des trois fonctions (Andrews, 2000; Andrews et Beeson, 2003; Beeson, 2002; Contini et al., 2008; Sharvia et Papadopoulos, 2008; Tao, 2010).

L'arbre des défaillances cohérent tracer avec le logiciel « Arbre Analyst » de ce système est illustré en figure III-3 et figure III-4

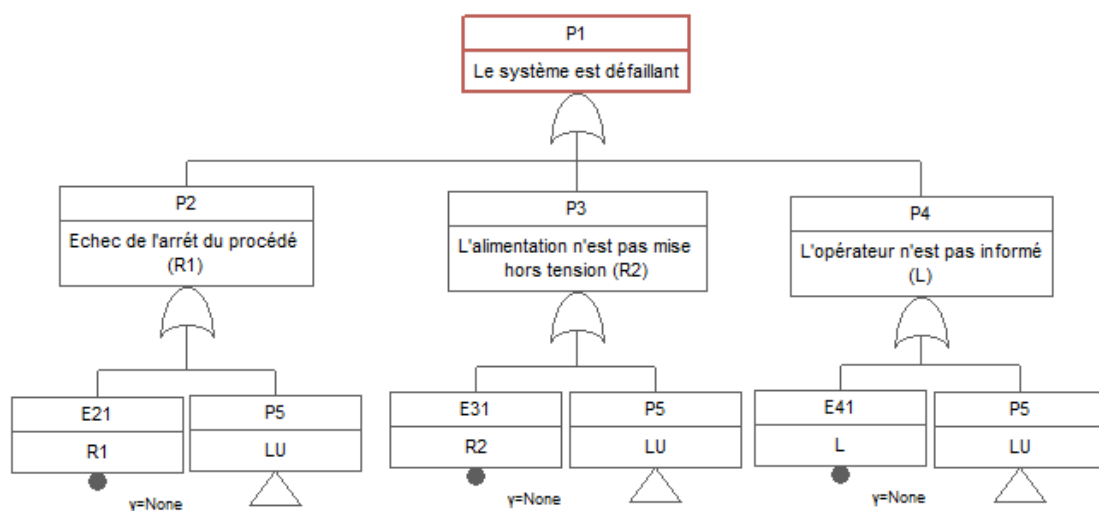


Figure III-3 Arbre des défaillances cohérent pour le système multitâche (“Arbre Analyst,” 2023)

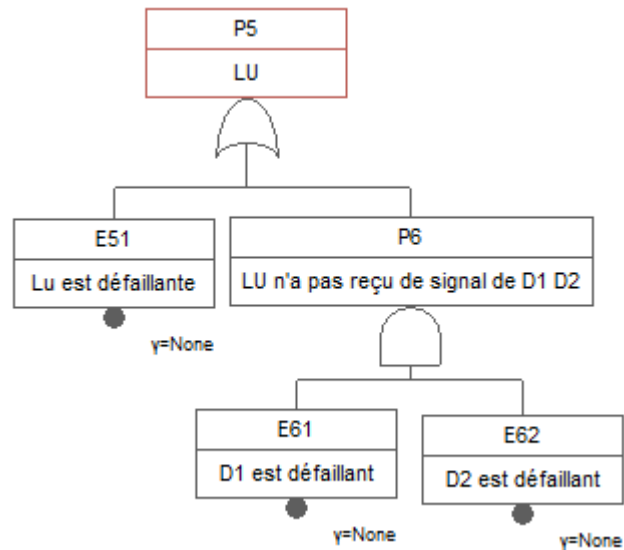


Figure III-4 La branche transfert pour LU (“Arbre Analyst,” 2023)

Explication de l’arbre :

R1 = le relais est défaillant

LU = le relais R1 n’a pas reçu de signal de LU

R2 = le relais R2 est défaillant

LU = le relais R2 n’a pas reçu de signal de LU

L = l’alarme est défaillante

LU = l’alarme n’a pas reçu de signal de LU

L’analyse qualitative de ce système donne :

$$P1 = P2 + P3 + P4$$

$$P2 = R1 + P5$$

$$P3 = R2 + P5$$

$$P4 = L + P5$$

$$P5 = LU + P6$$

$$P6 = D1D2$$

Ce qui implique que $P1 = R1 + R2 + L + LU + D1D2$

Ce système a cinq coupes minimales, quatre d'ordre 1 {R1, R2, L, LU} et une d'ordre 2 {D1D2}.

La question qui se pose est la suivante ; quelle est la partie non-cohérente du système, c'est-à-dire celle qui agit à l'inverse du comportement attendu. Dans ce cas, il s'agit d'une tâche mal exécutée, ce qui introduit la non-cohérence du système. Cette non-cohérence permet néanmoins au système de s'adapter aux fonctions qu'il doit accomplir sans mettre l'installation en danger. L'opérateur doit alors prendre des décisions appropriées en fonction du comportement du système, lequel doit être capable de l'avertir de l'exécution ou non des trois tâches.

Andrews (2000) a établi une table de vérité afin de détecter toutes les anomalies éventuelles dans le fonctionnement du système. Le système est considéré comme défaillant lorsqu'il n'accomplit pas une ou plusieurs de ses trois fonctions. Ainsi, huit combinaisons possibles d'états de défaillance ont été identifiées et sont présentées dans le tableau III-1

Tableau III-1 : Les états de défaillance du système de détection de gaz.

Sorties	Informé l'opérateur (L)	Mettre hors tension le procédé (R1)	Couper l'alimentation (R2)	Le système
1	0	0	0	Fonctionne
2	0	0	1	Fonctionne
3	0	1	0	Fonctionne
4	0	1	1	État critique.
5	1	0	0	Fonctionne
6	1	0	1	Fonctionne
7	1	1	0	Fonctionne
8	1	1	1	Défaillant

0 : fonctionne

1 : ne fonctionne pas

Les huit états identifiés représentent des situations de défaillance du système, certains étant plus sévères que d'autres. Dans six de ces états, le système demeure fonctionnel et exécute au moins une de ses trois tâches. Le huitième état correspond à une défaillance totale du système. Toutefois l'opérateur peut encore intervenir puisqu'il est averti de la défaillance (dans ce cas, il n'a simplement pas entendu l'alarme).

L'état critique est le n° 4 du tableau, dans lequel le système n'exécute pas ses tâches principales, à savoir, l'arrêt du procédé et la mise hors tension de l'alimentation, tout en

indiquant à l'opérateur qu'il a fonctionné correctement. L'opérateur entendant l'alarme croit alors que les tâches ont été accomplies et que le système fonctionne normalement. Cet état illustre la non-cohérence du système, qui doit être modélisée à l'aide d'un arbre des défaillances non-cohérent (Andrews, 2000; Andrews et Beeson, 2003; Beeson, 2002; Tao, 2010).

Afin que l'opérateur soit averti et puisse intervenir manuellement, les ADDs cohérents illustrés à la figure III-5 et à la figure III-6 modélisent la sortie n° 4. Cette modélisation a été réalisée à l'aide du logiciel « Isograph ».

L'analyse qualitative de cet ADD donne 3 coupes minimales, une d'ordre 1 {LU} et deux d'ordre deux {R1R2, D1D2}.

$$P1 = R1R2 + LU + D1D2$$

Logiquement, cet arbre des défaillances modélise le comportement du système multitâche ou du système de détection d'une fuite de gaz. Toutefois, il s'avère inexact, car les coupes minimales {LU} et {D1D2} ne provoquent pas la sortie n° 4. Par conséquent, la quantification de cet arbre de défaillance conduit à une surestimation significative de la probabilité associée à cette sortie.

Pour obtenir une évaluation correcte de cette dernière, il est essentiel d'intégrer la porte logique « NOT » lors de la construction de l'arbre des défaillances, afin de prendre en compte la partie fonctionnelle du système. Les arbres des défaillances non cohérents présentés à la figure III-7 et à la figure III-8 ont ainsi été obtenus à partir d'une évaluation non cohérente du résultat n° 4.

L'analyse qualitative donne :

$$P1 = P2 \times P3 \times P4$$

$$P1 = (-L) (-LU) R1R2 (-D1D2) = \bar{L} \bar{LU} R1 R2 (\overline{D1D2})$$

$$\text{Avec } P2 = \overline{P5} = \overline{(L + LU + D1D2)} = \bar{L} \bar{LU} (\overline{D1D2}) = \bar{L} \bar{LU} (\bar{D1} + \bar{D2})$$

$$P1 = \bar{L} \bar{LU} R1 R2 \bar{D1} + \bar{L} \bar{LU} R1 R2 \bar{D2}$$

Cet arbre des défaillances non-cohérent a deux impliquant premier d'ordre 5.

$\{\bar{L} \bar{L}U R1 R2 \bar{D}1, \bar{L} \bar{L}U R1 R2 \bar{D}2\}$

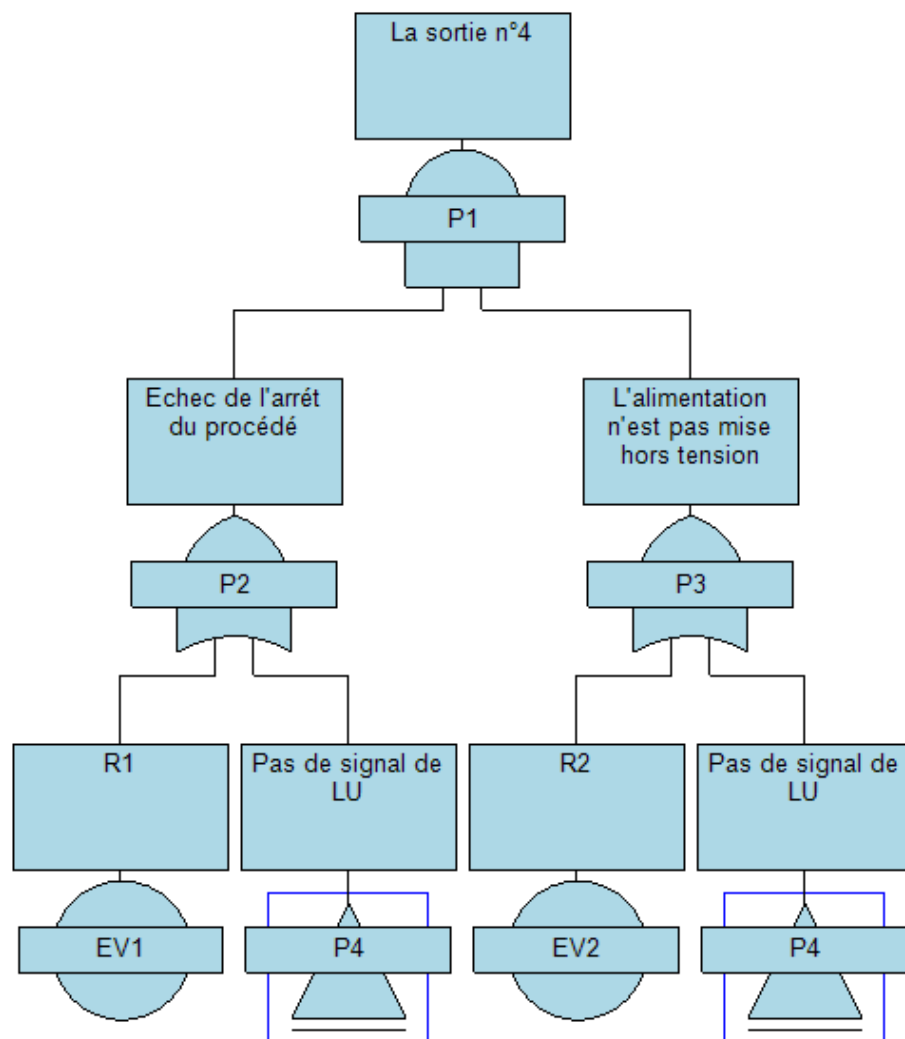


Figure III-5 L'arbre de défaillance cohérent de la sortie 4 ("Isograph Reliability Workbench 14.0,")

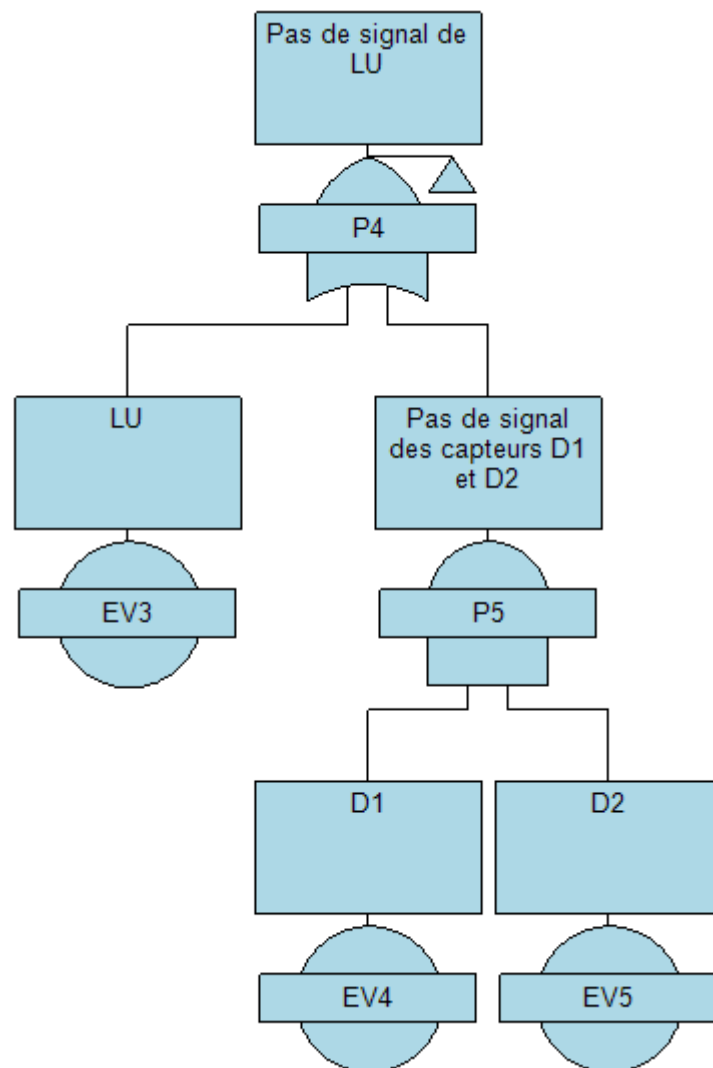


Figure III-6 Le transfert de la porte P4 de l'ADD cohérent de la sortie n°4 ("Isograph Reliability Workbench 14.0,").

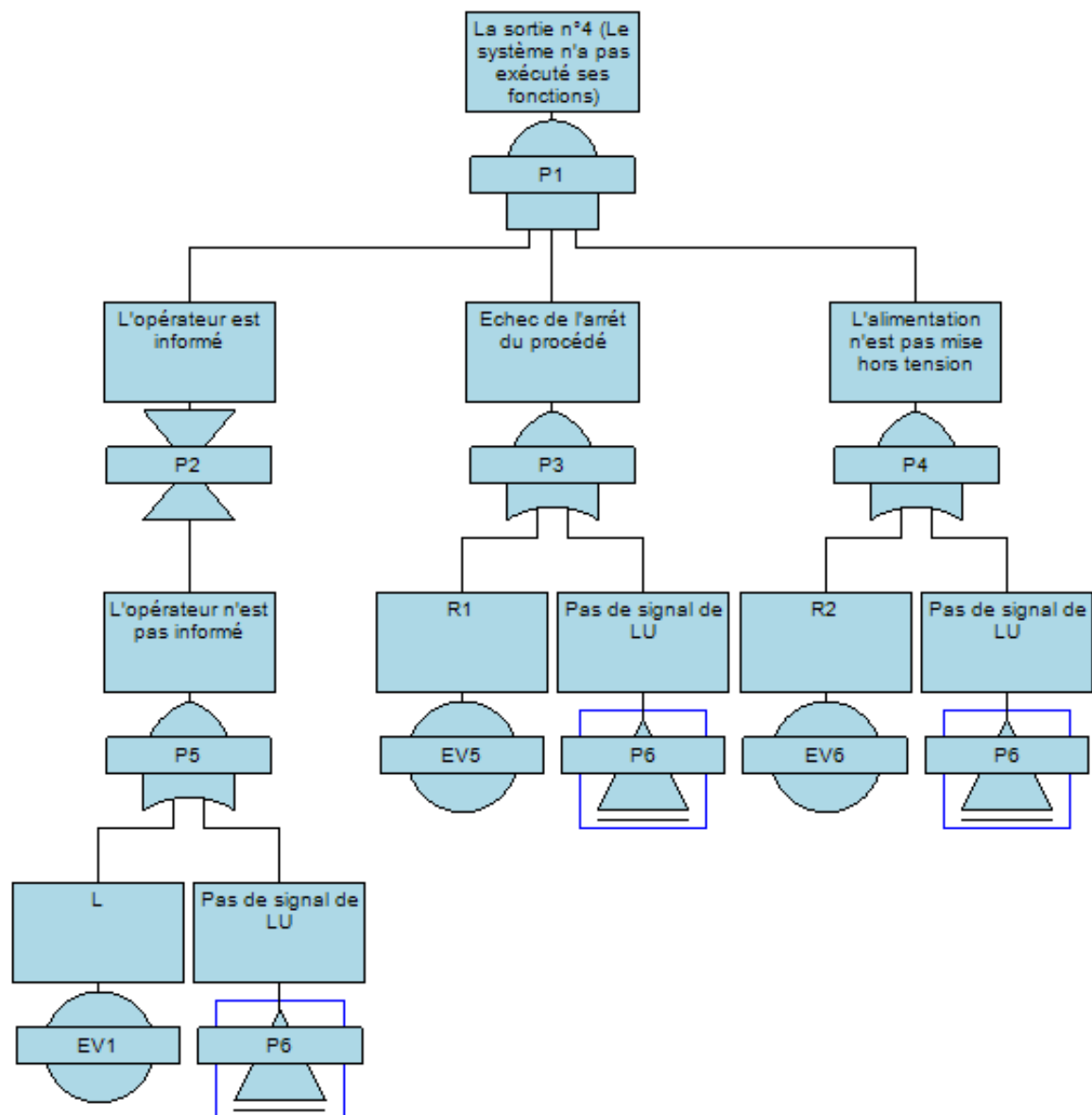


Figure III-7 L'ADD non-cohérent de la sortie n° 4 ("Isograph Reliability Workbench 14.0," 2014)

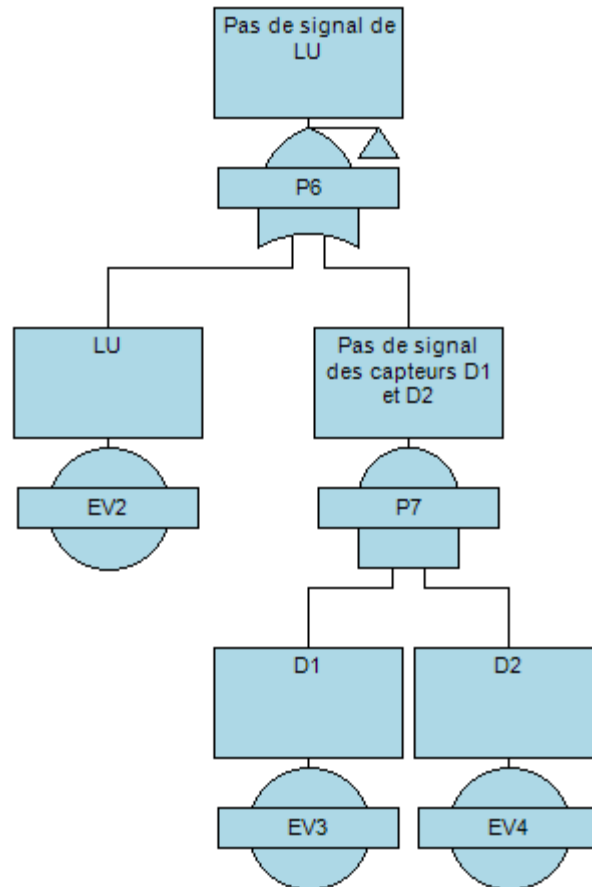


Figure III-8 Le transfert de la porte P6 de l'ADD non-cohérent ("Isograph Reliability Workbench 14.0," 2014)

Cet exemple introduit une porte logique « NOT » de manière indirecte. Son utilisation permet une modélisation représentative du système multitâches ou de détection d'une fuite de gaz. IL existe d'autres systèmes dans lesquels l'introduction de la porte logique « NOT » se fait d'une manière directe, notamment à travers l'utilisation de la porte logique « XOR » ou « OU exclusif » qui permet de modéliser des situations où deux événements qui ne peuvent pas se produire simultanément, comme le jour et la nuit.

III-4-2 - Système a deux alimentations électriques

La porte logique XOR (ou « OU exclusif ») signifie que les deux événements ne peuvent pas se produire simultanément. Autrement dit, lorsque l'un des événements se réalise, c'est l'état contraire de l'autre qui se produit, ce qui peut être représenté par l'introduction d'une

porte « NOT » conformément au modèle équivalent de la porte « XOR » donné par l'équation III-1. Dans ce cas, l'arbre des défaillances obtenu est non-cohérent. (Andrews et Moss, 2002 ; Contini et al. 2008 ; Imakhlaf, 2021).

La porte « XOR » est représentée par la logique de Boole.

$$\mathbf{A \text{ XOR } B = A \oplus B = A \bar{B} + \bar{A} B} \quad (\text{III-1})$$

Pour illustrer ce cas, considérons l'exemple d'une installation comportant deux sources d'alimentation électrique indépendantes. L'évènement principal « La perte partielle de l'alimentation » se produit lorsqu'une des deux alimentations tombe en panne, mais pas les deux simultanément. La représentation de ce système par un arbre de défaillance nécessite l'introduction d'une porte logique « OU exclusif » afin de modéliser correctement ce comportement (Andrews et Moss, 2002). La figure III-9 représente l'ADD correspondant à cet évènement principal, lequel peut être remplacé par l'ADD de la figure III-10 impliquant les opérateurs « OU », « ET » et « NOT » pour une modélisation équivalente.

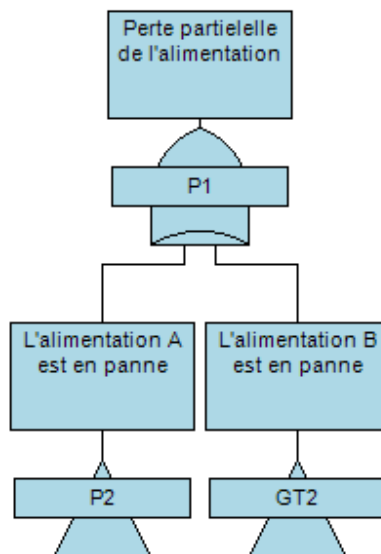


Figure III-9 Un exemple de la porte logique XOR

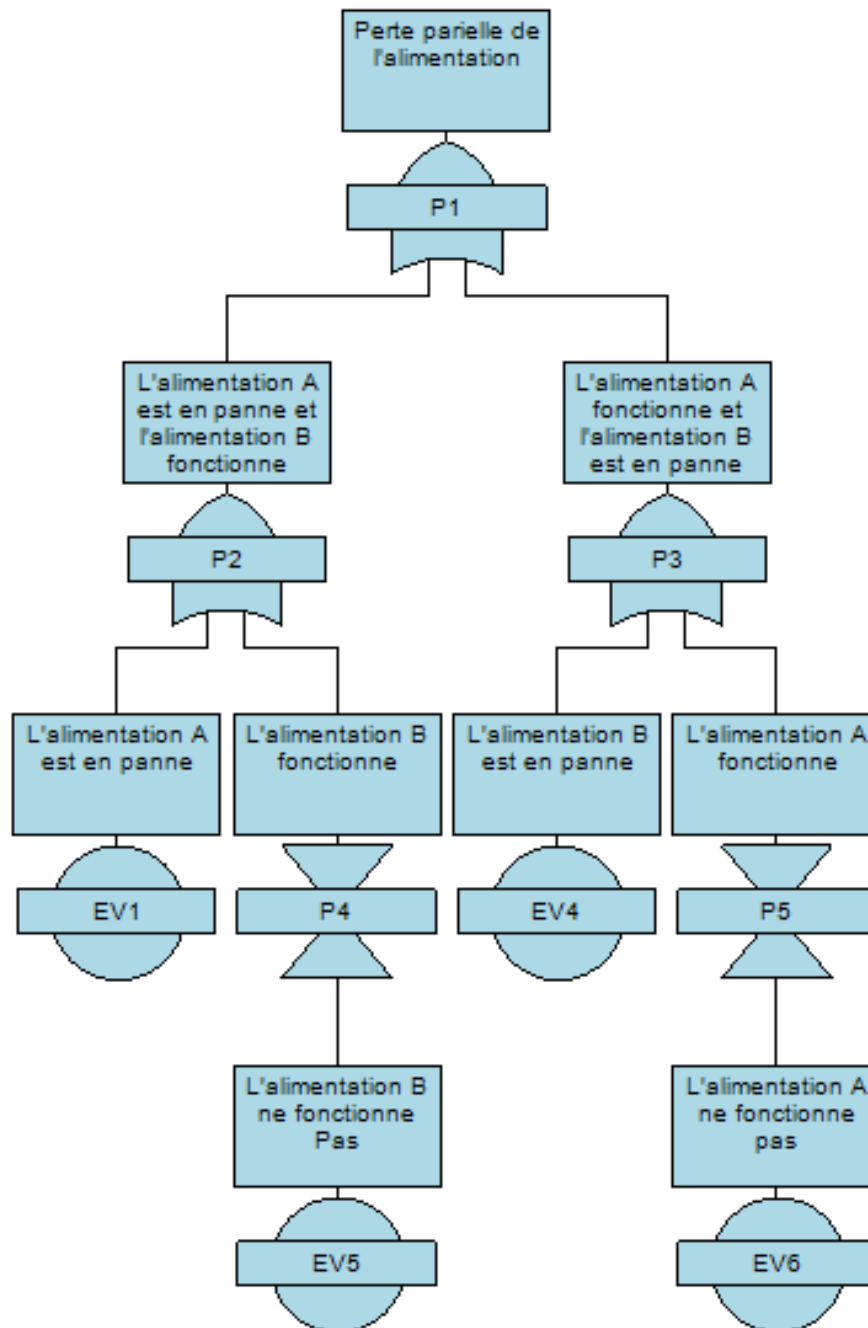


Figure III-10 L'arbre des défaillances équivalent à la porte « XOR »

III-5- L'analyse qualitative

L'analyse qualitative permet d'identifier l'ensemble des combinaisons possibles de composants susceptible de conduire à la défaillance du système. Dans le cas des arbres des défaillances cohérents, chaque cause possible est appelée coupe minimale, c'est-à-dire la

combinaison minimale de composants nécessaires et suffisants pour provoquer la défaillance du système. En revanche, pour les arbres des défaillances non-cohérents, les deux états des événements de base (l'état défaillant et l'état fonctionnel) sont pris en compte. Ainsi chaque cause possible de la défaillance du système est appelée **impliquant premier**, représentant la combinaison minimale des états défaillants et fonctionnels des composants, nécessaires et suffisants pour entraîner la défaillance du système.

À titre d'exemple d'impliquant premier, on peut citer le cas du système multitâches présenté à la figure III-2, dont les arbres des défaillances non-cohérents sont illustrés aux figures III-7 et III-8.

L'événement principal de ce système est exprimé par l'équation suivante :

$$P1 = \bar{L} \bar{L}U R1 R2 \bar{D1} + \bar{L} \bar{L}U R1 R2 \bar{D2}$$

Et il a deux impliquant premier d'ordre 5.

$$\{\bar{L} \bar{L}U R1 R2 \bar{D1}, \bar{L} \bar{L}U R1 R2 \bar{D2}\}$$

Pour le deuxième exemple avec la porte logique « XOR », l'expression de l'évènement principal est donnée par l'équation suivante :

$$P1 = A \bar{B} + \bar{A} B$$

Il a deux impliquant premier d'ordre 2 : $\{A\bar{B}, \bar{A}B\}$.

III-5-1- Les impliquant premiers

La première étape de l'analyse d'un arbre des défaillances non-cohérent consiste en une analyse qualitative, visant à identifier l'ensemble des impliquant premiers susceptibles de provoquer la défaillance du système. Cette étape prépare l'analyse quantitative, qui permettra d'évaluer les paramètres du système. Pour les arbres de petite taille ou dans le cas d'une analyse manuelle, il est souvent nécessaire de simplifier la structure de l'arbre des défaillances et pousser la porte logique « NOT » jusqu'aux événements de base. À cette fin, La loi de De Morgan, présentée par l'équation III-2 peut être appliquée (Beeson, 2002; Hurdle, 2008; Sharvia et Papadopoulos, 2008).

$$\overline{(A + B)} = \bar{A} \bar{B} \text{ et } \overline{(A B)} = \bar{A} + \bar{B} \quad (\text{III-2})$$

Représentation de la loi de De Morgan par un arbre des défaillances.

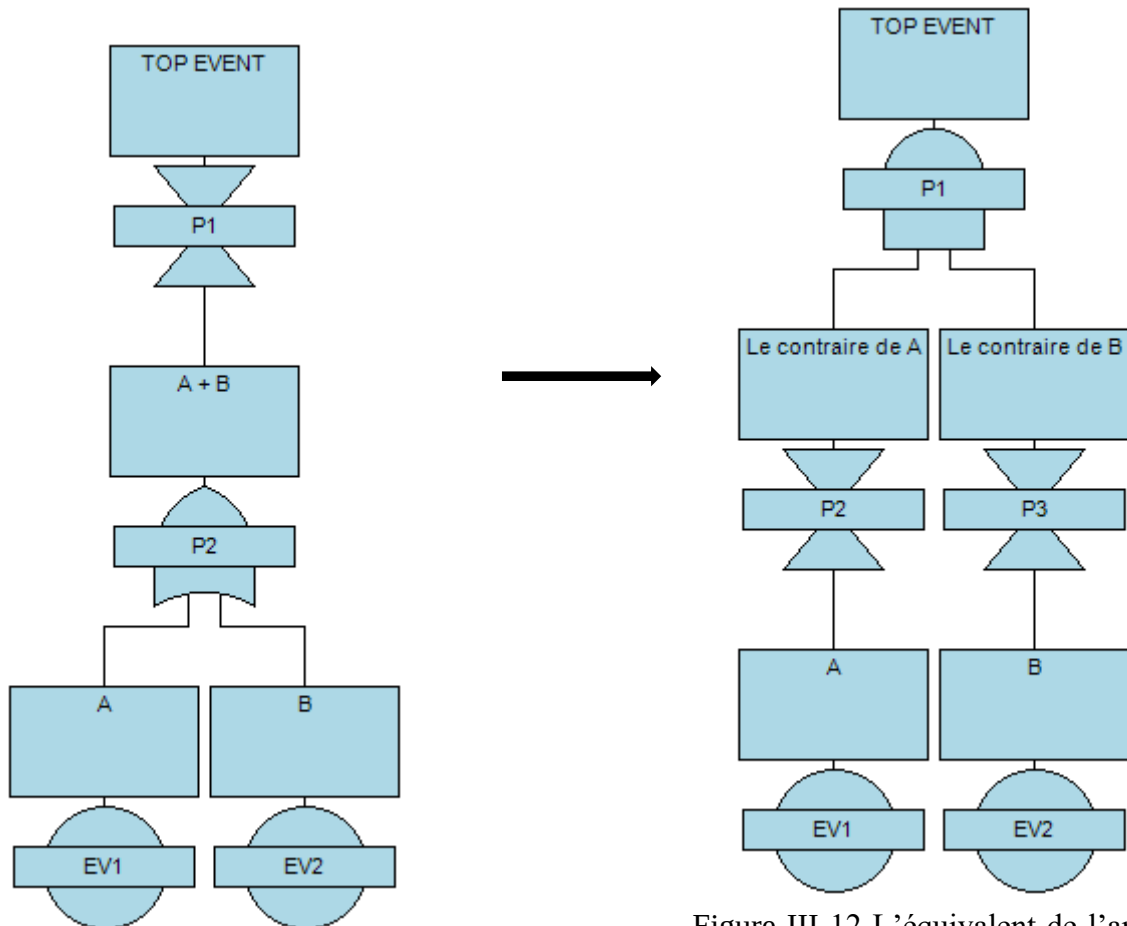


Figure III-11 l'arbre des défaillances non-cohérent de la porte « OU »

Figure III-12 L'équivalent de l'arbre des défaillances non-cohérent de la porte « OU »

La loi de De Morgan est utilisée pour propager la porte logique « NOT » jusqu'aux événements de base. Cette approche est jugée pratique par certains chercheurs, qui estiment qu'il est possible d'éliminer les portes « NOT » des événements intermédiaires.

Cependant selon notre analyse, chaque porte « NOT » supprimée est en réalité remplacée par deux autres au niveau des événements base, ce qui accroît le temps traitement des arbres

non-cohérents. Ainsi cette technique est préférable pour le traitement manuel des arbres non-cohérents de petite taille, où la simplification structurelle est gérable.

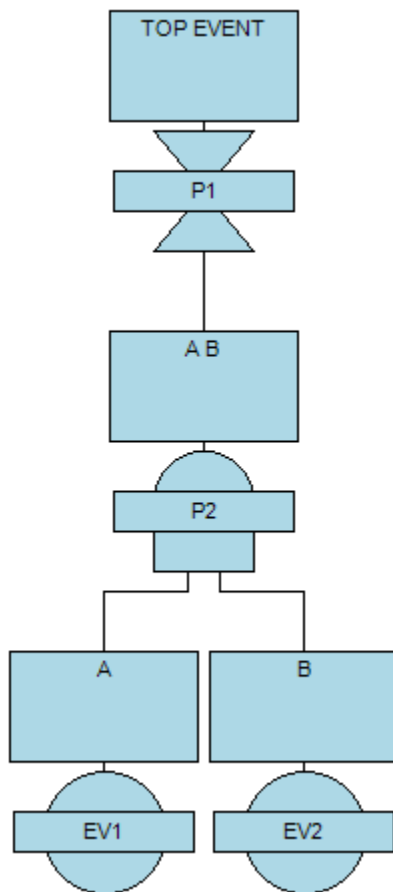


Figure III-13 L'arbre des défaillances non-cohérent de la porte « ET »

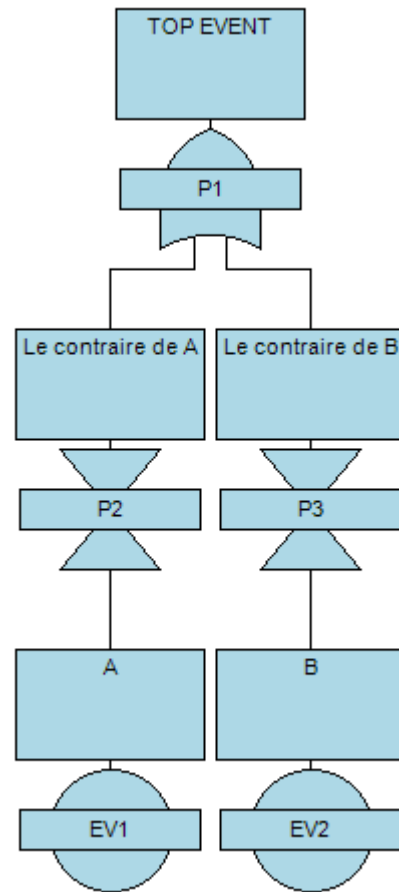


Figure III-14 l'équivalent de l'arbre des défaillances non-cohérent de la porte « ET »

L'application de la loi de De Morgan au modèle du système de multitâche permet d'obtenir la forme équivalente de son arbre des défaillances non-cohérent, dont la structure résultante est présentée aux figures III-15 et III-16

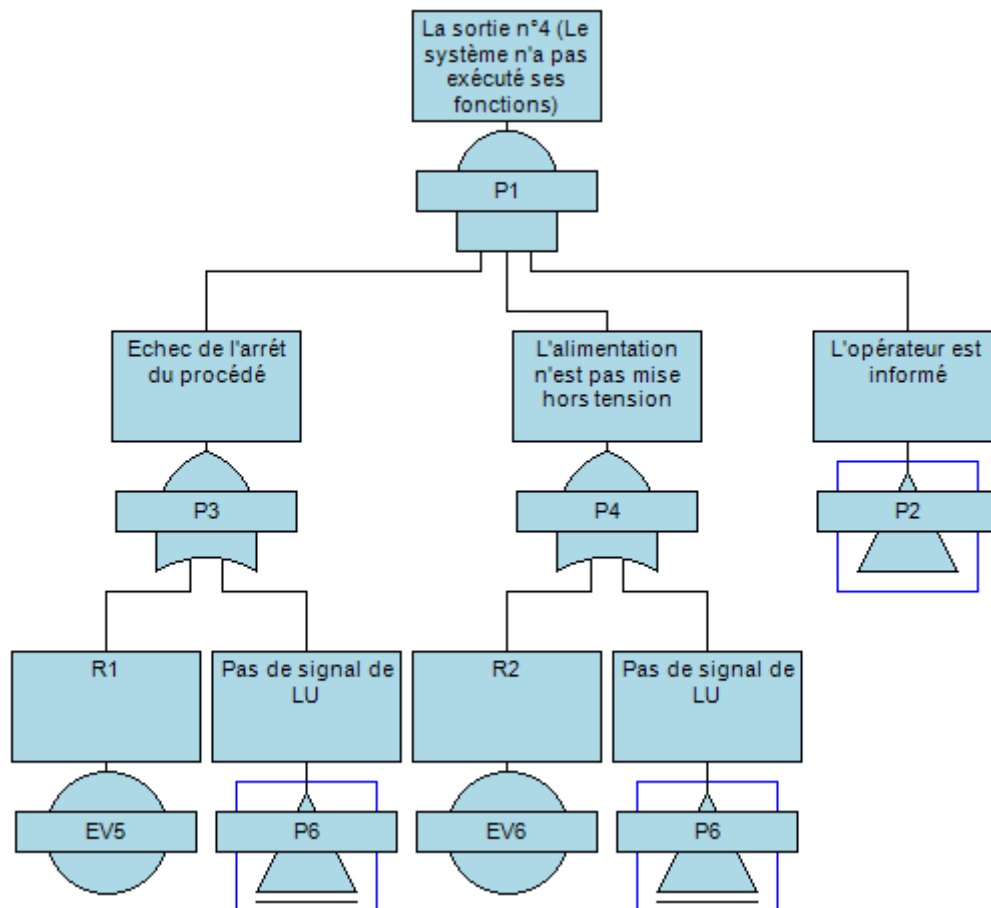


Figure III-15 L'ADD non-cohérent en propageant la porte « NOT » vers les événements de base

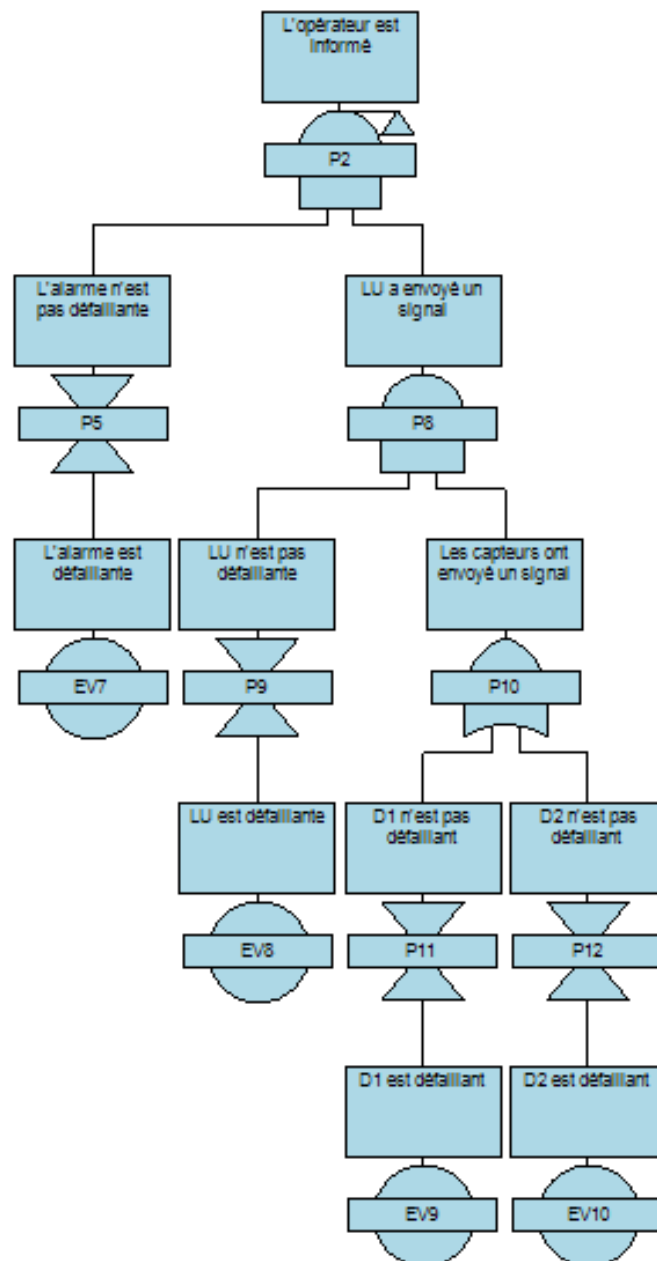


Figure III-16 Le transfert de la porte P2

III-5-2- Le théorème du Consensus

L'analyse qualitative d'un arbre des défaillances non-cohérent ne garantit pas toujours l'identification exhaustive de l'ensemble des impliquant premiers. Afin de mettre en évidence les impliquant premier non détectés lors de l'analyse initiale, l'application du théorème du

Consensus, présenté dans l'équation III-3, constitue un outil méthodologique particulièrement pertinent (Beeson, 2002; Hurdle, 2008; Sharvia et Papadopoulos, 2008).

$$AB + \bar{A}C = AB + \bar{A}C + BC \quad (\text{III-3})$$

Un exemple d'application du théorème du Consensus est présenté à La figure III-17, afin d'illustrer sa contribution à l'identification des impliquant premiers cachés dans un arbre des défaillances non-cohérent.

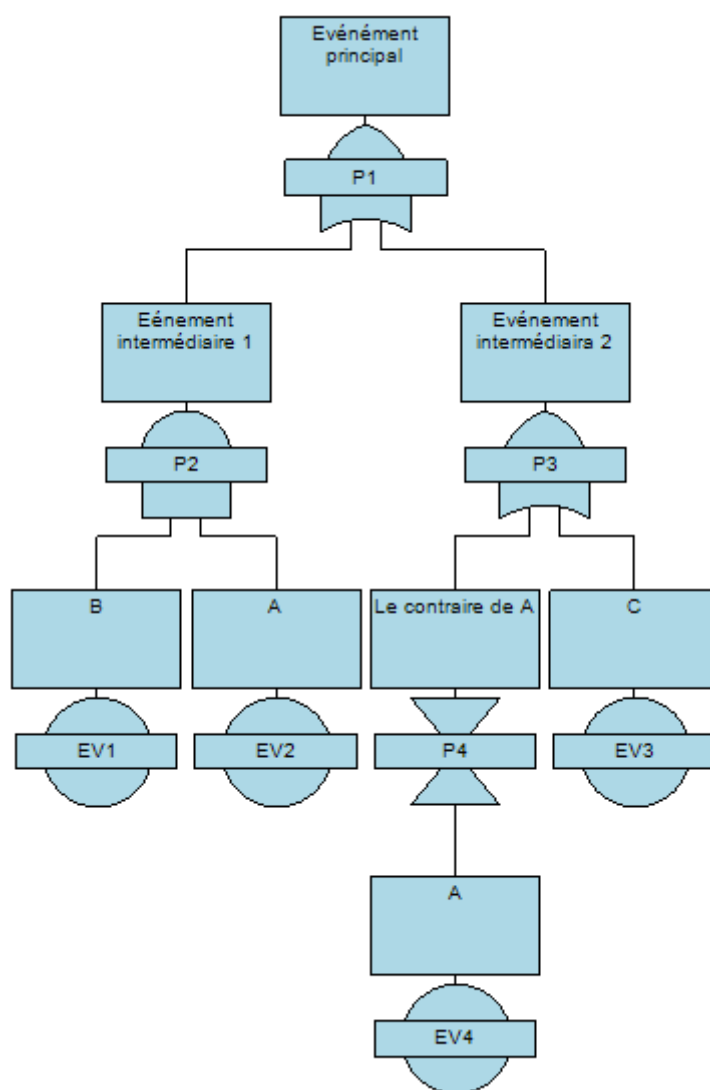


Figure III-17 Exemple d'application du théorème du Consensus

$$P1 = P2 + P3$$

$$P2 = AB$$

$$P3 = \bar{A} C$$

$$P1 = AB + \bar{A}C = AB + \bar{A}C + BC$$

BC est le troisième impliquant premier caché et détecté par le théorème du Consensus.

Le théorème du Consensus trouve son application lorsqu'un événement et son complémentaire contribuent simultanément à la défaillance du système, comme illustré dans l'exemple de la figure III-17 par les événements A et $\bar{A}$. Bien que son utilisation soit relativement aisée pour les arbres des défaillances de petite taille, son application devient rapidement complexe lorsqu'il s'agit de systèmes de grande dimension, en raison du nombre élevé d'impliquant premiers.

III-6- L'analyse quantitative

Les méthodes conventionnelles de l'analyse quantitative des arbres des défaillances cohérents telles que la méthode de la fonction de structure, le théorème de Shannon ou la méthode d'inclusion-exclusion présentées au chapitre II ne sont pas adaptées à l'évaluation des paramètres associés aux arbres des défaillances non-cohérents. Cette inadéquation résulte du fait que les ADDs cohérents ne prennent en considération que l'état défaillant des composants alors que les ADDs non-cohérents tiennent compte des deux états possibles : l'état défaillant et l'état fonctionnel du composant.

Dans sa thèse intitulée « *Non-coherent Fault Tree Analysis* » Beeson (2002) rapporte qu'Inagaki et Henley (1980) ont essayé d'étendre la méthode d'inclusion-exclusion aux arbres des défaillances non-cohérents. Toutefois la version modifiée de cette méthode s'est révélée applicable uniquement aux arbres de petite taille. Beeson souligne également que les diagrammes de décision binaires (BDD) se sont montrés plus adaptés au calcul des paramètres des arbres des défaillances qu'ils soient cohérents ou non-cohérents. (Beeson, 2002).

Imakhlaf (2021) rejoint les conclusions de Beeson (2002) concernant l'utilisation de la méthode d'inclusion-exclusion dans l'analyse quantitative des arbres des défaillances qu'ils soient cohérent ou non-cohérent. Il rapporte également qu'en 1992 les chercheurs Madre et Coudert (Coudert et Madre, 1992) ont utilisé les BDDs pour représenter les coupes minimales des fonctions booléennes. Un an plus tard, ils ont démontré la capacité de ces structures à traiter des ADDs comportant jusqu'à 10^{20} coupes minimales en seulement quelques secondes.

En 1993, Rauzy a démontré que l'utilisation des BDDs était mieux adaptée que toute autre méthode pour le traitement qualitatif et quantitatif des ADDs cohérents avec un nombre important de coupes minimales (Beeson, 2002; Imakhlaf, 2021; Rauzy, 1993).

Par la suite, en 1997, Rauzy et Dutuit ont étendu la méthode des BDDs afin de permettre une analyse qualitative complète des ADDs non-cohérents (Beeson, 2002). Enfin (Andrews, 2000) a développé une procédure de calcul de la probabilité de l'événement principal à partir de la fonction de structure de l'ADD qu'il a appelée SFBDD.

D'autres méthodes ont été développées pour calculer les paramètres d'un arbre des défaillances non-cohérent, (Remenye-Prescott et Andrews, 2008) présentent l'ensemble de ces méthodes dans leur article intitulé « *An Efficient Real-time Method of Analysis for Non-coherent Fault Trees* ». Les auteurs y décrivent en détail les différentes méthodes existantes et en proposent une comparaison. Pour le lecteur souhaitant approfondir ses connaissances, il est donc possible de se référer directement à leur travail, puisque cette étude n'a pas pour objectif de les exposer en détail.

III-6-1- Les facteurs d'importance

Le calcul des facteurs d'importance est une étape essentielle de l'analyse quantitative, qui aide l'analyste à identifier les composants, les événements de base ou les éléments les plus critiques du système, dont l'amélioration peut contribuer à renforcer les performances du système. Au cours des trois dernières décennies, ces facteurs ont suscité un vif intérêt et de nombreux indicateurs d'importance ont été développés, bien qu'ils soient presque exclusivement dédiés aux arbres des défaillances cohérents. En revanche, dans le cas des arbres des défaillances non-cohérents, le nombre de facteurs d'importance disponibles demeure limité (Beeson et Andrews, 2003; Beeson, 2002; Imakhlaf, 2021; Tao, 2010).

En 1983, Jackson a proposé une extension pour les facteurs d'importance les plus couramment utilisés, tels que le facteur d'importance de Birnbaum. Toutefois, ses extensions ne sont pas cohérentes, car elles consistent à classer séparément les états des composants, c'est-à-dire, en évaluant indépendamment leur état défaillant et leur état fonctionnel. Or l'analyse d'un arbre des défaillances non-cohérent doit tenir compte simultanément de ces deux états, puisqu'ils peuvent chacun contribuer à la défaillance du système (Andrews et Beeson, 2003; Beeson et Andrews, 2003; Beeson, 2002)

Dans le cas d'un arbre des défaillances cohérent, le calcul des facteurs d'importance repose exclusivement sur l'état défaillant des composants. Dans un système cohérent, un composant ne peut être que dans un état de défaillance critique (failure critical). En revanche, pour un arbre des défaillances non-cohérent, la défaillance du système peut résulter aussi bien de l'état défaillant que de l'état fonctionnel des composants. Ainsi, un composant peut y adopter soit un état de défaillance critique (failure critical), soit un état de réparation critique (repair critical). Par conséquent, les deux états doivent impérativement être pris en considération lors du calcul des facteurs d'importance, afin de refléter correctement l'influence réelle de chaque composant sur le comportement du système.

Andrews et Beeson (2003) et Beeson et Andrews (2003) ont étendu le facteur d'importance de Birnbaum ainsi que trois autres facteurs dérivés de celui-ci, tels que le facteur d'importance critique et enfin le facteur d'importance de Fussell-Vesely. Dans cette étude, nous retenons les facteurs d'importance de Birnbaum et de Fussell-Vesely.

1- Le facteur d'importance de Birnbaum

L'extension du facteur d'importance de Birnbaum, également appelé le facteur d'importance marginal, est donnée par les équations III-4, III-5, III-6. Dans ce cadre, il est nécessaire de considérer séparément les états critiques du composant, puisqu'un événement de base ne peut se trouver que dans un état à la fois, soit en état de défaillance, soit en état fonctionnel.

Un composant est dans un état de défaillance critique (failure critical), si et seulement si le système est fonctionnel et que la défaillance du composant i entraîne la défaillance du système. Le facteur de Birnbaum pour la défaillance critique du composant i , est alors donné par l'équation III-4.

$$I_{Bi}^F = \frac{\partial Q_{sys}(t)}{\partial q_i} \quad (III-4)$$

De manière similaire, un composant est dans un état de réparation critique (repair critical), si, et seulement si, le système fonctionne et la remise en état du composant i entraîne la défaillance du système. Le facteur de Birnbaum associé à la réparation critique du composant i est donné par l'équation III-5.

$$I_{Bi}^R = \frac{\partial Q_{sys}(t)}{\partial p_i} \quad (III-5)$$

Le facteur d'importance de Birnbaum total associé au composant i est obtenu en sommant les contributions correspondantes à ses deux états critiques, puisque celui-ci peut, à tout instant, se trouver soit en état de défaillance critique, soit en état de réparation critique. Cette valeur représente ainsi la contribution globale du composant i au comportement défaillant du système. L'équation III-6 formalise cette contribution.

$$I_B = I_{Bi}^F + I_{Bi}^R \quad (III-6)$$

Avec

∂Q_{sys} = L'indisponibilité du système

∂q_i = L'indisponibilité du composant i

∂p_i = La disponibilité du composant i

Et $q_i + p_i = 1$ $p_i = 1 - q_i$

2- Le facteur d'importance de Fussell-Vesely

À l'image du facteur d'importance de Birnbaum, le facteur d'importance de Fussell-Vesely se décompose également en deux contributions distinctes, correspondant aux différents états des composants dans le cadre d'un système non-cohérent. L'équation III-7 exprime la contribution du composant i en situation de défaillance critique (failure critical), tandis que l'équation III-8 représente sa contribution en situation de réparation critique (repair critical). L'équation III-9 fournit enfin la contribution totale du composant i .

$$I_{FVi}^F = \frac{P[\cup_{K=1}^{n_p} i \in C_K] C_K]}{Q_{sys}(t)} \quad (III-7)$$

$$I_{FVi}^R = \frac{P[\cup_{K=1}^{n_p} \bar{i} \in C_K] C_K]}{Q_{sys}(t)} \quad (III-8)$$

$$I_{FV} = I_{FV}^F + I_{FV}^R \quad (\text{III-9})$$

Avec

I_{FV}^F = le facteur d'importance de Fussell-Vesely pour le composant en état de défaillance critique

I_{FV}^R = le facteur d'importance de Fussell-Vesely pour le composant en état de réparation critique

$P [\bigcup_{k=1; i \in C_k}^{n_p} C_k]$ = la probabilité de l'union des impliquant premiers

n_p = le nombre total des impliquant premiers

C_k = l'ensemble des impliquant premiers

III-7-Conclusion

Bien que moins répandus que les systèmes cohérents, les systèmes non-cohérents existent et nécessitent l'introduction de la porte logique « NOT », ce qui double le nombre d'événements de base, en représentant chaque événement par son état défaillant et fonctionnel (x_i et $\bar{x}_i$). Depuis les années 1970, l'utilisation de cette porte a suscité diverses critiques, notamment :

- La représentation simultanée des deux états des composants peut suggérer une conception inappropriée.
- La quantité d'information apportée par la porte NOT est souvent perçue comme limitée.
- La probabilité de l'état complémentaire ($\bar{x}$) est généralement proche de 1 ; cela réduit son impact sur l'analyse quantitative.
- L'ajout de la porte logique « NOT » accroît significativement le temps nécessaire à l'analyse qualitative et quantitative.

En revanche, plusieurs travaux ont démontré les avantages de cette approche, notamment :

- Capturer fidèlement le comportement non-cohérent des systèmes complexes,
- Identifier des éléments critiques ou insoupçonnés pour l'analyse et la maintenance,
- Enrichir l'information disponible

L'analyse d'un arbre des défaillances non-cohérent se divise en deux parties, comme pour un arbre des défaillances cohérent avec certaines particularités. L'analyse qualitative consiste à calculer les impliquant et les impliquant premiers, qui représentent respectivement les combinaisons et les plus petites combinaisons de composants susceptibles d'entraîner l'événement indésirable. L'analyse quantitative, qui s'appuie sur les résultats de l'analyse qualitative, permet d'estimer les paramètres associés à l'arbre des défaillances, tels que la probabilité ou l'indisponibilité de l'événement principal, son intensité de défaillance, ainsi que le nombre de défaillances prévisibles.

Pour calculer ces paramètres, l'analyse quantitative pour un arbre des défaillances non-cohérent ne repose pas sur les méthodes classiques telles que la méthode de la fonction de structure, le théorème de Shannon ou encore la méthode d'inclusion-exclusion. En effet, ces approches sont mal adaptées à ce type d'arbres et conduisent souvent à des estimations surestimées. À l'inverse, l'utilisation des Diagrammes de Décision Binaires (BDD) s'avère particulièrement efficace pour l'analyse des arbres non-cohérents, car ils permettent de prendre explicitement en compte les deux états possibles des composants. Les BDD peuvent traiter des arbres de grande taille.

L'analyse quantitative permet également d'estimer la contribution de chaque composant à la défaillance du système, cette contribution étant généralement exprimée au moyen de facteurs d'importance. Dans le cas d'un arbre des défaillances non-cohérent, chaque facteur d'importance se décompose en deux composantes distinctes, représentant respectivement la contribution du composant dans son état défaillant (*failure critical*) et dans son état fonctionnel (*repair critical*). Cette double représentation est nécessaire pour tenir compte du comportement non monotone du système.

Dans ce qui suit, les arbres des défaillances cohérents serviront de base à la nouvelle méthode : l'arbre des défaillances *semi-cohérent* dont l'objectif est d'identifier les composants ou les sous-systèmes dont l'état est incompatible avec celui du système principal. L'arbre des défaillances non-cohérent, quant à lui sera utilisé pour l'analyse détaillé du système. L'ensemble de cette démarche constitue l'objet du chapitre IV et représente la contribution principale de ce travail.

Chapitre IV

Application de la méthode semi-cohérente pour l'analyse du risque majeur d'emballlement thermique

Sommaire du chapitre IV

IV-1-Introduction	122
IV-2- Première partie : Explication de la méthode utilisée	123
IV-2-1- La méthode proposée.....	123
IV-2-3- L'approche semi-cohérente	126
IV-3- Deuxième partie	129
IV-3-1- Application de la méthode semi-cohérente.	129
IV-3-2- Les résultats de l'étude	133
IV-3-2-1- Les résultats de l'arbre des défaillances cohérent	134
IV-3-2-2- Application et résultats de l'arbre des défaillances semi-cohérent	136
IV-3-2-3- Les résultats pour l'arbre des défaillances non-cohérent	138
IV-4- La variation de la conception du système	145
IV-5- La méthode de l'arbre des défaillances non-cohérent classique	147
IV-6- Conclusion.....	156

VI-1-Introduction

Il n'est pas toujours aisé de modéliser un système non cohérent. L'exemple du système multitâche illustre concrètement la complexité de l'analyse de ce type de systèmes et la difficulté à identifier les parties non-cohérentes. En effet, la détection des éléments dont l'état est en contradiction avec celui du système global demeure une étape délicate. Dans ce contexte, il est nécessaire de procéder dans un premier temps à une modélisation à l'aide d'un arbre des défaillances cohérent, afin d'identifier les parties dont l'état est inverse à celui du système. Une fois ces éléments détectés, la modélisation peut alors être affinée par la construction d'un arbre des défaillances non-cohérent.

La transition de l'arbre cohérent vers l'arbre des défaillances non-cohérent est rendue possible grâce à l'approche que nous avons développée, appelée *arbre des défaillances semi-cohérent*. Cette approche permet d'identifier systématiquement les parties non-cohérentes du système et d'inverser leurs états dans l'arbre non-cohérent, assurant une modélisation plus fidèle et une analyse pertinente du comportement du système.

L'approche proposée va être appliquée à l'analyse de l'emballlement thermique pour un réacteur continu adiabatique catalytique à lits fixes de synthèse du méthanol au sein du CPIZ, une filiale du groupe SONATRACH. En tant qu'élément central des installations chimiques et pétrochimiques, le réacteur joue un rôle clé dans la transformation des matières premières en produits destinés aux usages industriels et domestiques.

Les réactions chimiques qui se produisent au niveau des réacteurs produisent des températures fortement exothermiques qui doivent être contrôlées par des systèmes de refroidissement fiables. À défaut, une perte d'équilibre thermique peut entraîner une élévation incontrôlée de la température et conduire au risque majeur d'emballlement thermique.

Ce chapitre a pour objectif d'analyser le risque d'emballlement thermique à l'aide des méthodes des arbres des défaillances, en introduisant une méthode intermédiaire destinée à faciliter le passage d'un arbre des défaillances cohérent à un arbre non-cohérent. Il est organisé en deux parties distinctes : la première est consacrée à la présentation de la méthode proposée, tandis que la seconde en démontre l'application à travers une étude de cas et propose une comparaison avec la méthode traditionnelle, laquelle repose sur la duplication de l'ensemble des événements de base pour la construction de l'arbre des défaillances non-cohérent.

IV-2- Première partie : Explication de la méthode utilisée

IV-2-1- La méthode proposée

Lorsqu'un système non-cohérent est modélisé par un arbre des défaillances non-cohérent, il devient nécessaire de dupliquer ses événements de base, chacun devant être représenté à la fois par son état défaillant et son état fonctionnel. Cette caractéristique entraîne une augmentation significative de la taille de l'arbre, ainsi qu'un accroissement du temps nécessaire à sa construction et son évaluation. Afin de réduire cette complexité, il est essentiel d'identifier les événements de base dont l'état est contraire à celui du système, puis d'inverser cet état.

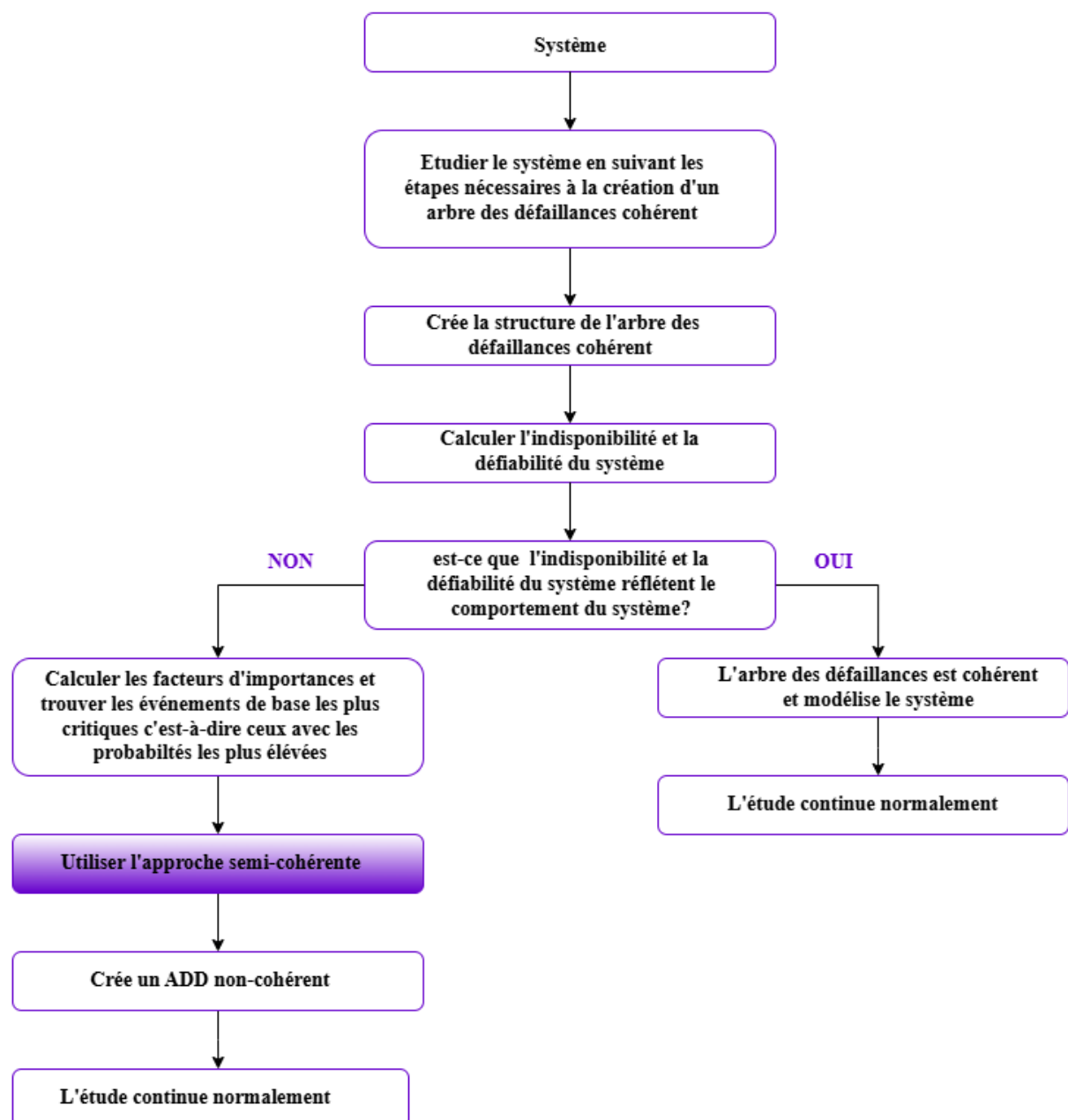


Figure IV-1 La description de la méthode proposée

Cette démarche permet d'obtenir un arbre des défaillances moins volumineux et dont la construction et l'évaluation sont plus rapides. La mise en œuvre de cette simplification nécessite une approche capable de détecter précisément les événements de base se trouvant dans un état opposé à celui du système. Cette approche, que nous désignons sous le terme d'arbre des défaillances semi-cohérent, sera définie, développée et appliquée à ce genre de système (voir figure IV-2).

La méthode proposée s'articule autour de trois parties complémentaires ; la première consiste à modéliser le système à l'aide d'un arbre des défaillances cohérent, tel que présenté au chapitre II. La seconde étape repose sur l'approche semi-cohérente qui sera décrite en détail dans ce chapitre et permet d'identifier les événements de base non-cohérents. Enfin, la troisième étape correspond à l'analyse du système au moyen d'un arbre des défaillances non-cohérent, dont les principes et les techniques ont été exposés au chapitre III.

La figure IV-1 présente les différentes étapes de la méthode proposée, lesquelles sont expliquées dans les sections suivantes.

1- L'étude débute par une analyse fonctionnelle et structurelle du système. L'analyse fonctionnelle permet d'identifier la fonction globale du système. L'analyse structurelle, quant à elle, consiste à définir l'architecture générale du système, à décrire les différents composants qui le constituent, leurs fonctions respectives, leurs connexions et leurs interactions, ainsi que leur emplacement respectif. Elle offre une vision claire et détaillée de l'organisation du système.

2- Ensuite, le système est modélisé à l'aide d'un arbre des défaillances cohérent, permettant de représenter l'ensemble des causes possibles de l'événement indésirable en fonction de l'état de ses composants. Une fois les données nécessaires attribuées aux événements de base, l'arbre peut être analysé. Cette analyse fournit deux types de résultats complémentaires :

2-1- L'analyse qualitative identifie les coupes minimales, c'est-à-dire les plus petites combinaisons de composants dont la défaillance entraîne l'occurrence de l'événement principal. Elle constitue une étape préalable essentielle pour l'analyse quantitative.

2-2- L'analyse quantitative permet de calculer les différents paramètres associés à l'arbre des défaillances, tels que l'indisponibilité du système (Q_{sys}), donnée par l'équation II-23 du chapitre II et l'équation IV-1 du chapitre IV. Cet indicateur constitue un élément essentiel pour évaluer l'acceptabilité des performances du système. L'indisponibilité est estimée à partir de la somme des indisponibilités des coupes des minimales (Q_i). Une fois ce paramètre calculé à

l'aide du logiciel approprié, l'analyste peut évaluer la pertinence du modèle du système. Si le modèle représente fidèlement le système, c'est-à-dire qu'il indique un fonctionnement lorsque le système est effectivement opérationnel, et une défaillance lorsqu'il est réellement en panne, alors le système est considéré comme cohérent et l'analyse traditionnelle peut se poursuivre normalement.

$$Q_{sys}(t) = \sum_i^n Q_i(t) \quad (IV-1)$$

2-3- S'il est impossible d'analyser le système à partir de son modèle cohérent, notamment lorsque l'indisponibilité obtenue est très élevée, proche de 1, cela indique un état contraire à celui du système réel. Autrement dit, le système est effectivement opérationnel, mais son modèle prédit une situation de panne. Dans ce cas, le système est classé comme non-cohérent.

Deux approches peuvent alors être utilisées pour analyser les arbres des défaillances non-cohérents,

- a- la méthode traditionnelle, qui consiste à dupliquer tous les événements de base, en considérant simultanément leur état défaillant et leur état fonctionnel. Cette méthode conduit toutefois à un arbre volumineux, difficile à manipuler et à analyser.
- b- où notre approche, l'arbre des défaillances semi-cohérent, qui vise à identifier les composants dont l'état est contraire à celui du système, puis à inverser leur état. Cette étape permet de construire un arbre des défaillances non-cohérent allégé, plus représentatif et plus efficace à analyser.

3-L'analyse quantitative permet également de calculer les facteurs d'importance qui quantifient la contribution de chaque composant à l'apparition de l'événement principal. Les équations II-29 et II-32 présentées au chapitre II, donnent l'expression des facteurs d'importance utilisés dans cette étude. Ces équations sont reprises dans ce chapitre sous les numéros IV-2 et IV-3. Les facteurs d'importance servent à identifier les éléments les plus critiques du système. Ces éléments peuvent correspondre à un ou plusieurs sous-systèmes ou encore à des composants dont le comportement s'avère non-cohérent, ce qui signifie que même s'ils sont dépannés, le modèle du système ne fonctionne pas comme attendu.

Le facteur d'importance de Birnbaum

$$I_i^B = \frac{\partial Q_{sys}(t)}{\partial q_i(t)} \quad (IV-2)$$

Le facteur d'importance de Fussell-Vesely

$$I_i^{FV} = \frac{P[\cup_{k=1}^n \{i \in C_k\}]}{Q_{sys}(t)} \quad (IV-3)$$

4- L'approche semi-cohérente est appliquée lorsque le modèle de l'arbre des défaillances cohérent se révèle incapable de modéliser correctement le comportement du système. Dans ce cas, les éléments identifiés comme non-cohérents sont retirés de l'arbre pour construire le modèle semi-cohérent. Ce modèle intermédiaire est utilisé pour recalculer la probabilité de l'événement principal ou son indisponibilité comme le montre l'équation IV-4 et les facteurs d'importance associés.

$$Q_{sys}(t) = \sum_i^{n-1} q_i(t) \quad (IV-4)$$

5- L'élément retiré est ensuite réintroduit dans l'ADD non-cohérent dans son état opposé, puis l'indisponibilité ainsi que les facteurs d'importance sont recalculés. Les résultats obtenus doivent être cohérents avec ceux de l'approche semi-cohérente.

IV-2-3- L'approche semi-cohérente

L'arbre des défaillances semi-cohérent proposé par Benomar et al. introduit une approche innovante pour l'identification des éléments non-cohérents dans les systèmes non-cohérents. Cette méthode permet de diminuer significativement la taille de l'arbre des défaillances non-cohérent et le nombre d'entités considérées, améliorant ainsi l'efficacité de l'analyse. (Voir figure IV-2).

Elle est mise en œuvre lorsque l'arbre des défaillances cohérent s'avère insuffisant pour représenter fidèlement le comportement du système. Elle est élaborée à partir des résultats de l'analyse cohérente et s'appuie sur un processus itératif composé de neuf étapes.

Première étape : Utilisation des résultats de l'arbre cohérent

Les résultats issus de l'arbre des défaillances cohérent sont utilisés comme référence. Lorsque ces résultats indiquent une indisponibilité proche de l'unité ($Q \cong 1$), le modèle prédit un état de défaillance du système, alors que celui-ci demeure en réalité opérationnel.

Deuxième étape : Calcul des facteurs d'importance

Les facteurs d'importance sont calculés en utilisant les équations IV-2 et IV-3 afin d'évaluer l'impact de chaque composant sur le système.

Troisième étape : Identification de l'élément le plus critique

L'entité associée au facteur d'importance le plus élevé est identifiée comme l'élément le plus critique du système.

Quatrième partie : Réparation de l'élément le plus critique

L'entité est réparée dans le but d'optimiser la fiabilité globale du système.

Cinquième partie : Vérification de l'état du système

Il convient de vérifier si l'amélioration de la fiabilité de l'entité critique a permis de rétablir le système dans un état opérationnel. Si ce n'est pas le cas, l'analyse se poursuit conformément à l'étape suivante

Sixième étape : Retrait du composant du modèle cohérent

Supprimer le composant du modèle cohérent du système.

Septième étape : Construction de l'arbre semi-cohérent

Un nouvel arbre des défaillances cohérent est construit en omettant l'élément précédemment retiré. Cet arbre modifié est appelé arbre des défaillances semi-cohérent.

Huitième étape : Évaluation du nouvel arbre

Le nouvel arbre est évalué à l'aide de l'équation (IV-4). Si l'indisponibilité du système obtenue est acceptable (inférieure à 0,5), l'analyse s'achève et l'élément retiré est désigné comme composant non-cohérent.

Neuvième étape : Itération pour les éléments restants

Dans le cas où le modèle semi-cohérent ne représente pas correctement le comportement du système, avec une indisponibilité encore élevée, un nouvel élément est identifié. L'analyse reprend alors à l'étape 3, en appliquant l'équation (IV-6), et ce processus est répété jusqu'à ce que tous les composants non-cohérents du système soient détectés.

$$Q_{sys}(t) = \sum_i^{n-2} Q_i(t) \quad (IV-6)$$

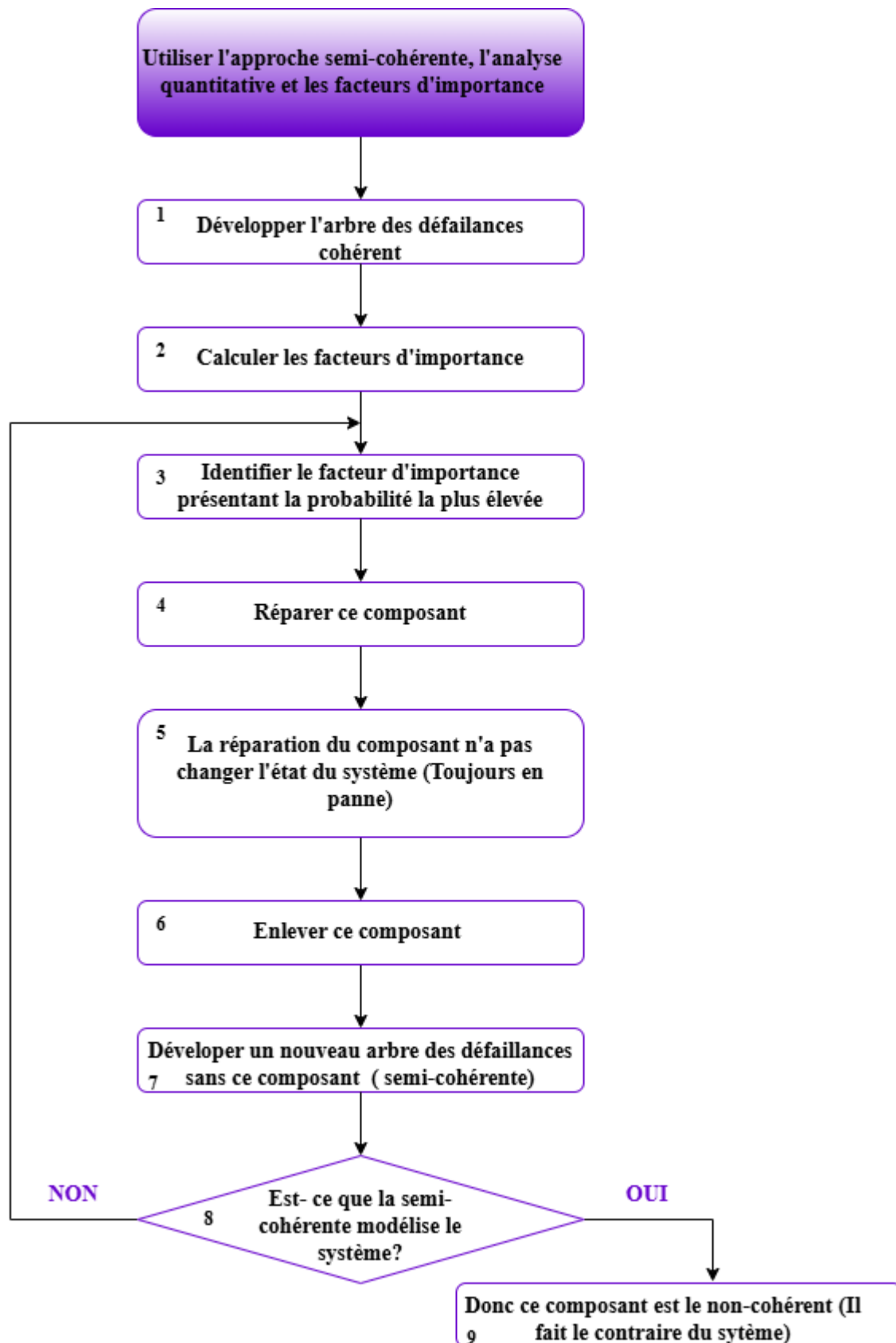


Figure IV-2 L'approche semi-cohérente

IV-3-Deuxième partie

IV-3-1-Application de la méthode semi-cohérente.

La nouvelle méthode développée dans la première partie du chapitre IV est appliquée à analyser le système de refroidissement d'un réacteur adiabatique catalytique à lit fixe utilisé pour la synthèse du méthanol au sein de la société CP1Z du groupe SONATRACH.

La boucle de synthèse constitue la section où le gaz de synthèse est converti en méthanol. Dans cette boucle, le réacteur V501 (voir figures IV-3 et IV-4) est un récipient cylindrique vertical contenant quatre lits fixes de catalyseur. Le gaz de synthèse entrant dans le réacteur traverse successivement ces lits, provoquant une augmentation de la température liée à la réaction exothermique. La température interne du réacteur ne doit pas dépasser 270 °C, une valeur qui doit être maintenue grâce à un système de refroidissement fiable.

Le refroidissement est assuré par l'injection de gaz de quench par l'intermédiaire de quatre vannes : TRC501, TRC502, TRC503, TRC504, positionnées à la sortie de chaque lit pour abaisser la température du gaz converti avant d'arriver au lit suivant. Le gaz de synthèse est constitué d'un mélange de gaz frais provenant du compresseur k401 et de gaz recyclé issu du séparateur V502. Ces deux flux se rejoignent au niveau de la vanne FR402. Le mélange est ensuite comprimé par le compresseur de recirculation K402, mesuré par le débitmètre FI403 et puis réparti par la vanne FR403 dans la boucle.

Le contrôle thermique est assuré par quatre capteurs de température installés à la sortie de chaque lit : ST541, ST542, ST543 et ST544, et par quatre alarmes de haute température : TIAH501, TIAH502, TIAH503 et TIAH504 destinées à prévenir tout dépassement de la limite de sécurité.

Au cours du procédé, seulement 3% du gaz de synthèse est converti en méthanol, le reste est refroidi, puis recyclé pour se joindre au gaz frais et former le gaz de refroidissement, lequel sert également de gaz de synthèse.

Le système de refroidissement du réacteur V501 est constitué de plusieurs composants (voir figure IV-3), chacun défini par son mode de défaillance spécifique, le code qui le représente dans l'arbre des défaillances, son taux de défaillance par heure et le temps moyen de réparation (MTTR) par heure. Les données de fiabilité utilisées proviennent principalement de la base de données OREDA ("Oreda, Offshore Reliability Data Handbook. OREDA," 2002). Les paramètres associés aux alarmes sont issus de la base de données « Component Reliability Data

Used in the Probabilistic Safety Assessment » (“Agency.I.A.E. Component Reliability Data for use in Probabilistic. Safety Assessment. IAEA.,” 1988), l’ensemble des valeurs retenues est présenté dans le tableau IV-1.

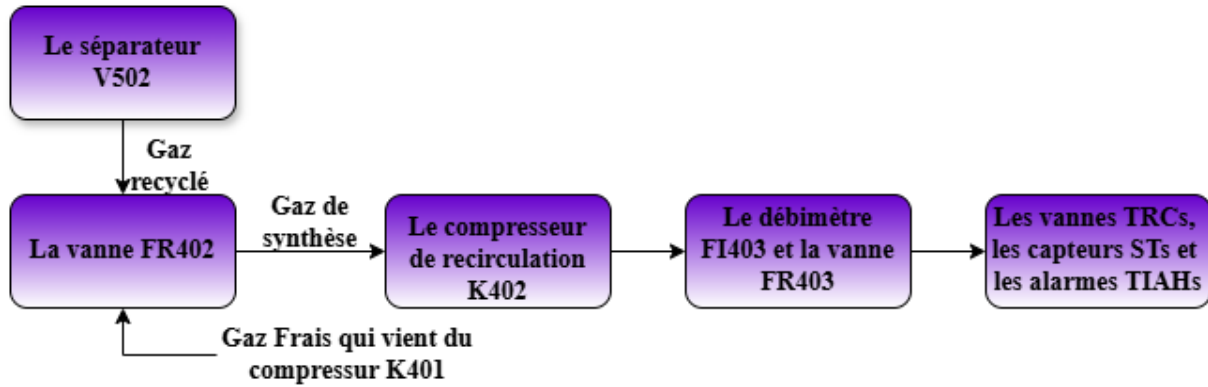


Figure IV-3 La structure du système de refroidissement du réacteur V501



Figure IV-4 Le réacteur V501 de la synthèse de méthanol (*Manuel d’utilisation du méthanol, rapport interne de la société CP1Z, ORAN, ALGÉRIE., 2014*)

Le modèle d'analyse développé dans cette étude s'appuie sur des arbres des défaillances cohérents, semi-cohérents et les non-cohérents, implémentés via le logiciel ISOGRAPH ("Isograph Reliability Workbench 14.0," 2014) pour l'analyse du système de refroidissement du réacteur adiabatique catalytique à lits fixes. L'ensemble des composants considérés est du type réparable et leurs défaillances restent latentes jusqu'au test périodique annuel (8760 heures). Dans ce contexte, le logiciel Isograph recommande l'utilisation du modèle de défaillance « DORMANT », adapté aux situations où une défaillance n'est détectée qu'au moment de l'inspection annuelle. Ce modèle est défini par l'équation IV-7.

$$Q_{\max} = 1 - e^{-\lambda\theta} \quad (\text{IV-7})$$

Avec

Q = Indisponibilité maximale du système

λ = taux de défaillance constant

θ = l'intervalle de test

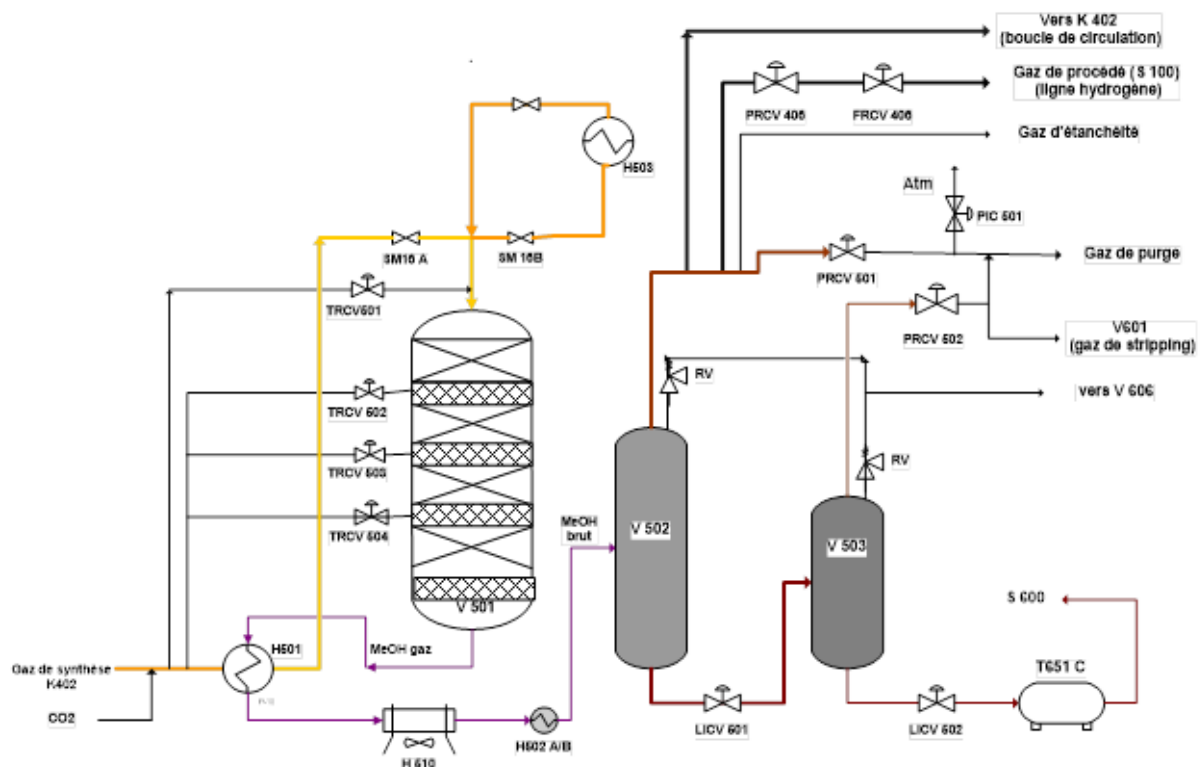


Figure IV-5 La boucle de synthèse (*Manuel d'utilisation du méthanol, rapport interne de la société CP1Z, ORAN, ALGÉRIE., 2014*)

Tableau VI-1 Les composants, leurs modes de défaillances, leurs taux de défaillances et leurs MTTR

Les composants	Le mode de défaillance	Code	Le taux de défaillance (par heure)	MTTR
La vanne de débit FR402	Bloquée fermée	EV1	$3.97 \cdot 10^{-6}$	5.3
Le séparateur V502	Défaillance	EV2	$1.07 \cdot 10^{-6}$	2.4
Le compresseur K402	Défaillance mécanique	EV3	$9.32 \cdot 10^{-6}$	77.8
Le compresseur K402	Fuite externe	EV4	$5 \cdot 10^{-6}$	0.5
La vanne de débit FR403	Bloquée Fermée	EV8	$3.97 \cdot 10^{-6}$	6
Le débitmètre FI403	Indique un niveau haut	EV9	$0.75 \cdot 10^{-6}$	4
La vanne de régulation pour le lit1 (TRC501)	Bloquée fermée	EV10	$5.44 \cdot 10^{-6}$	2
Le capteur de température pour le lit 1 (ST541)	Indique un niveau haut	EV11	$2.03 \cdot 10^{-6}$	2
L'alarme pour le lit 1 (TIAH1)	Défaillante	EV12	$7.8 \cdot 10^{-7}$	4
La vanne de régulation pour le lit 2 (TRC502)	Bloquée fermée	EV13	$5.44 \cdot 10^{-6}$	2
Le capteur de température pour le lit 2 (ST542)	Indique un niveau haut	EV14	$2.03 \cdot 10^{-6}$	2
L'alarme pour le lit 2 (TIAH2)	Défaillante	EV15	$7.8 \cdot 10^{-7}$	4
La vanne de régulation pour le lit 3 (TRC503)	Bloquée fermée	EV16	$5.44 \cdot 10^{-6}$	2
Le capteur de température pour le lit 3 (ST543)	Indique un niveau haut	EV17	$2.03 \cdot 10^{-6}$	2
L'alarme pour le lit 3 (TIAH3)	Défaillante	EV18	$7.8 \cdot 10^{-7}$	4
La vanne de régulation pour le lit 4 (TRC504)	Bloquée fermée	EV19	$5.44 \cdot 10^{-6}$	2
Le capteur de température pour le lit 4 (ST544)	Indique un niveau haut	EV20	$2.03 \cdot 10^{-6}$	2
L'alarme pour le lit 4 (TIAH4)	Défaillante	EV21	$7.8 \cdot 10^{-7}$	2
La turbine	Défaillance mécanique	EV5	$9.32 \cdot 10^{-6}$	77.8
La turbine	Fuite externe	EV7	$8.47 \cdot 10^{-4}$	48.6
La chaudière	Défaillante	EV6	$11.98 \cdot 10^{-6}$	16

IV-3-2- Les résultats de l'étude

Les trois méthodes d'analyse ont fourni les résultats présentés dans les sections suivantes. L'arbre des défaillances cohérent diverge du fonctionnement réel du système, l'indiquant en panne alors qu'il reste opérationnel. L'arbre semi-cohérent identifie les composants non-cohérents et l'arbre non-cohérent fournit une modélisation fidèle et révèle les points faibles du système.

IV-3-2-1- Les résultats de l'arbre des défaillances cohérent

L'analyse du système de refroidissement a été réalisée à l'aide de l'arbre des défaillances cohérent, dont la structure est présentée à la figure IV-6, avec l'événement principal retenu « Défaillance du système de refroidissement », qui a été choisi afin d'évaluer la capacité du système à maintenir l'équilibre entre la chaleur évacuée par le système de refroidissement et la chaleur générée par la réaction.

Comme le montre la figure IV-6, la structure de l'arbre des défaillances est organisée en trois sous-systèmes principaux. Le premier correspond à *l'absence de gaz de synthèse*, tandis que le second représente *l'absence de débit de gaz de synthèse*. Enfin, le troisième sous-système présenté aux figures IV-8 et IV-9 concerne *la défaillance du contrôle de la température*.

Ses trois ensembles principaux contribuent directement à l'événement principal par l'intermédiaire d'une porte logique « OU » (P1). Chacun d'eux est ensuite décomposé en blocs fonctionnels dont les composants élémentaires sont listés au tableau IV-1 et sont reliés au sein du modèle à l'aide de portes logiques « OU » et « ET ». Cette structuration permet de représenter de manière fidèle les différents mécanismes susceptibles d'entraîner la défaillance du système de refroidissement (voir les figures IV-6, IV-7, IV-8 et IV-9).

L'analyse quantitative de l'arbre des défaillances cohérent met en évidence une divergence notable entre le modèle et le comportement réel du système. Alors que le système fonctionne normalement, le modèle le considère en panne, avec une indisponibilité de $Q = 0.9996$ et un temps d'arrêt total de 8757h.

Cette incohérence démontre que l'arbre des défaillances cohérent ne représente pas correctement le système. En effet, le système de refroidissement constitue une boucle de rétroaction, et comme indiqué au chapitre III, tout système comportant une boucle, est par

nature, non-cohérent. Il doit donc être modélisé à l'aide d'un arbre de défaillances non-cohérent (nc-FTA), plus adapté à ce type de configuration. Dans ce contexte, l'étape suivante consiste à déterminer les facteurs d'importance. Le tableau IV-2 présente le classement par ordre croissant de ces facteurs, en vue de l'application de la méthode semi-cohérente.

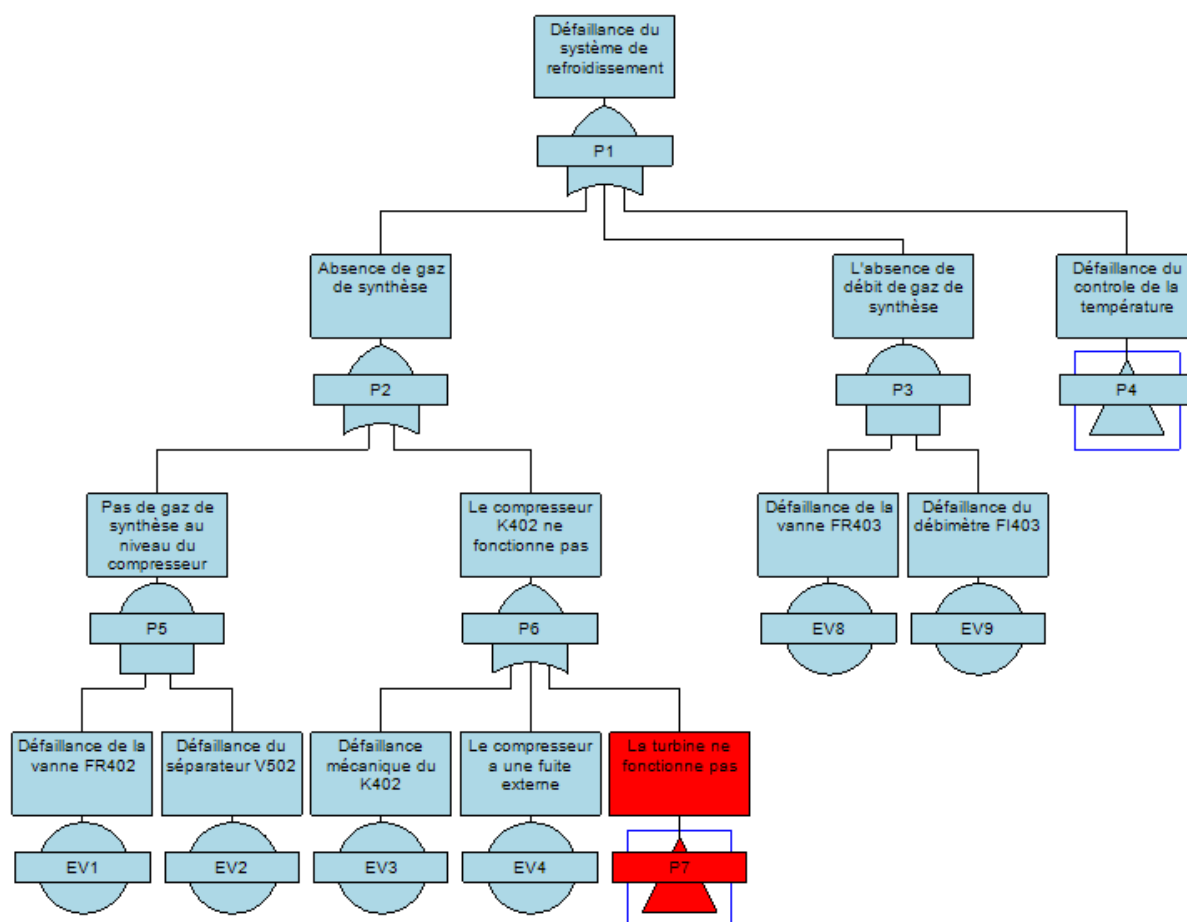


Figure IV-6 L'arbre des défaillances cohérent

Tableau IV-2 Les facteurs d'importance pour l'arbre des défaillances cohérent

Evènement	Fussell-vesely	Birnbaum	Evènement	Fussell-Vesely	Birnbaum
EV7	0.549	1	EV16	0.02556	1
EV6	0.05472	1	EV4	0.02354	1
EV5	0.04306	1	EV14	0.009682	1
EV3	0.04306	1	EV20	0.009682	1
EV18	0.03655	1	EV11	0.009682	1
EV12	0.03628	1	EV17	0.009682	1
EV15	0.03628	1	EV2	0.0001752	0.03418
EV21	0.03628	1	EV1	0.0001752	0.009329
EV19	0.02556	1	EV8	0.0001229	0.00648
EV10	0.02556	1	EV9	0.000129	0.03418
EV13	0.02556	1			

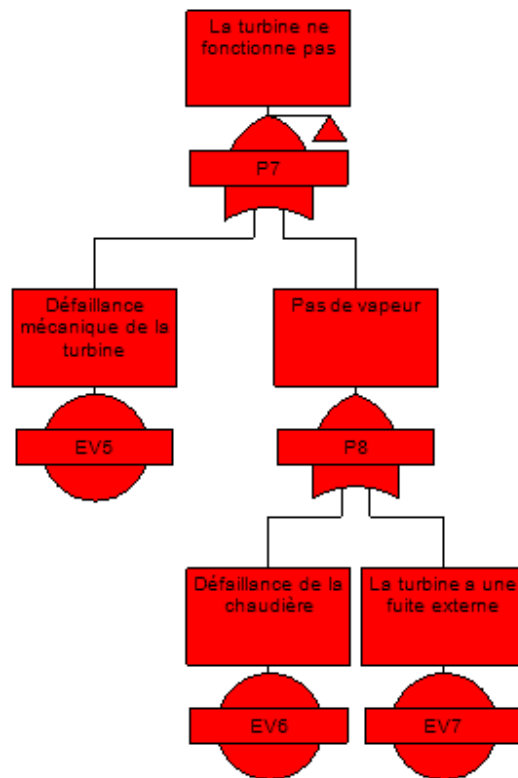


Figure IV-7 L'arbre des défaillances cohérent de la turbine ne fonctionne pas

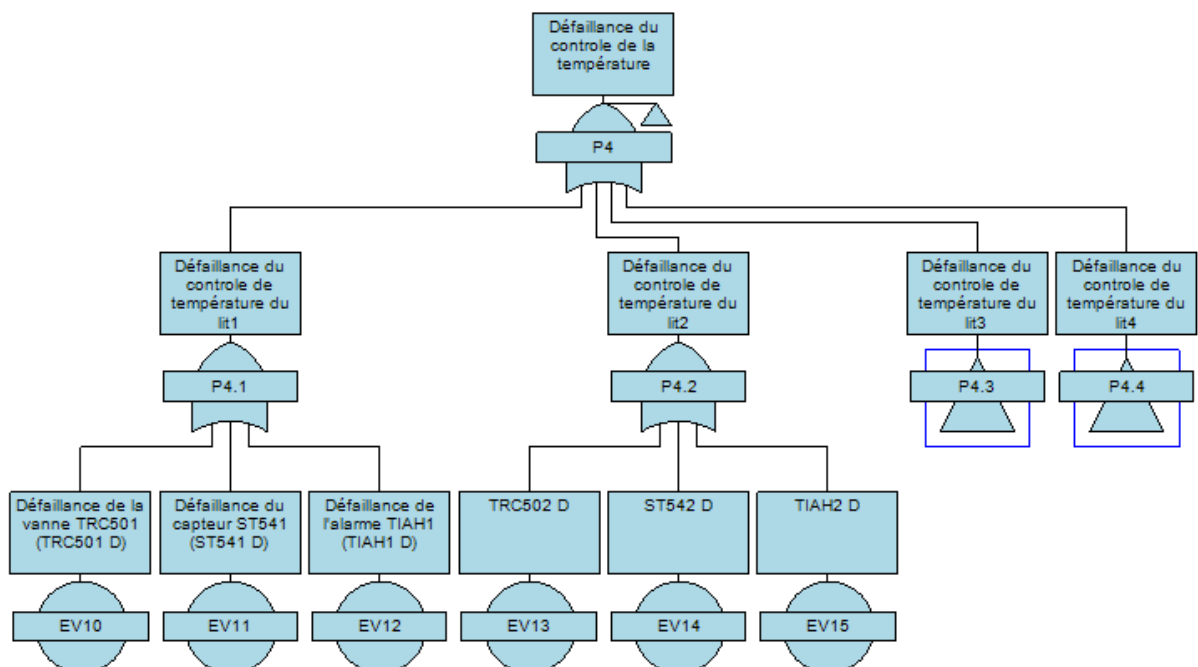


Figure IV-8 L'arbre des défaillances cohérent pour le contrôle de température

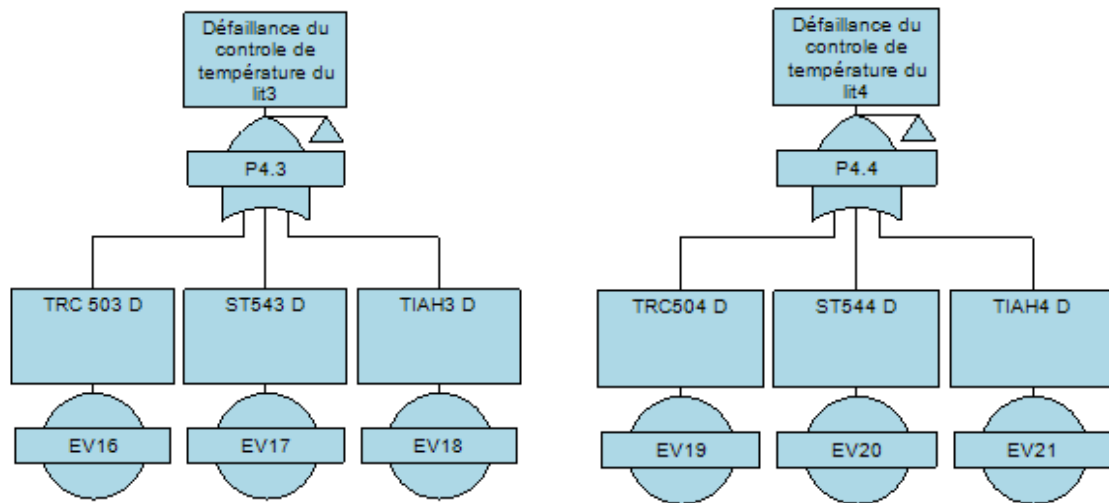


Figure IV-9 Le transfert de la porte P4.3 et P4.4 de l'arbre des défaillances cohérent du contrôle de la température

IV-3-2-2- Application et résultats de l'arbre des défaillances semi-cohérent

Les résultats de l'arbre des défaillances cohérents servent de base à l'élaboration de l'arbre semi-cohérent. Les facteurs d'importance sont ensuite utilisés afin d'identifier les composants les plus influents sur la fiabilité du système. Dans cette étude, la turbine est identifiée comme le composant le plus critique. Sa défaillance est associée à l'événement de base « La turbine a une fuite externe » caractérisé par un taux de défaillance $\lambda = 8,47 \cdot 10^{-4}/h$. Cependant, même après amélioration du composant par redondance dans le modèle ou par ajustement de son intervalle de test périodique, la défaillance globale du système subsiste et suit la configuration de la figure III-1.

Le sous-système « La turbine ne fonctionne pas » est retiré du modèle afin de construire l'arbre des défaillances semi-cohérent (voir la figure IV-10 et les figures IV-8, IV-9). L'analyse de ce nouvel arbre est ensuite réalisée, suivie d'une évaluation quantitative qui conduit à une indisponibilité $Q = 0.2729$ et un temps d'arrêt total de 2390 h, des valeurs jugées acceptables au regard de celles obtenues avec l'arbre des défaillances cohérent.

Ces résultats confirment que le sous-système « La turbine ne fonctionne pas » correspond à l'élément non cohérent du système. Par conséquent, l'inversion de son état dans l'arbre des défaillances non-cohérent est nécessaire pour représenter fidèlement le comportement du

système de refroidissement du réacteur adiabatique catalytique à lits fixes. L'approche proposée, fondée sur l'arbre des défaillances semi-cohérent, permet ainsi d'identifier de manière systématique les éléments non cohérents d'un système non cohérent.

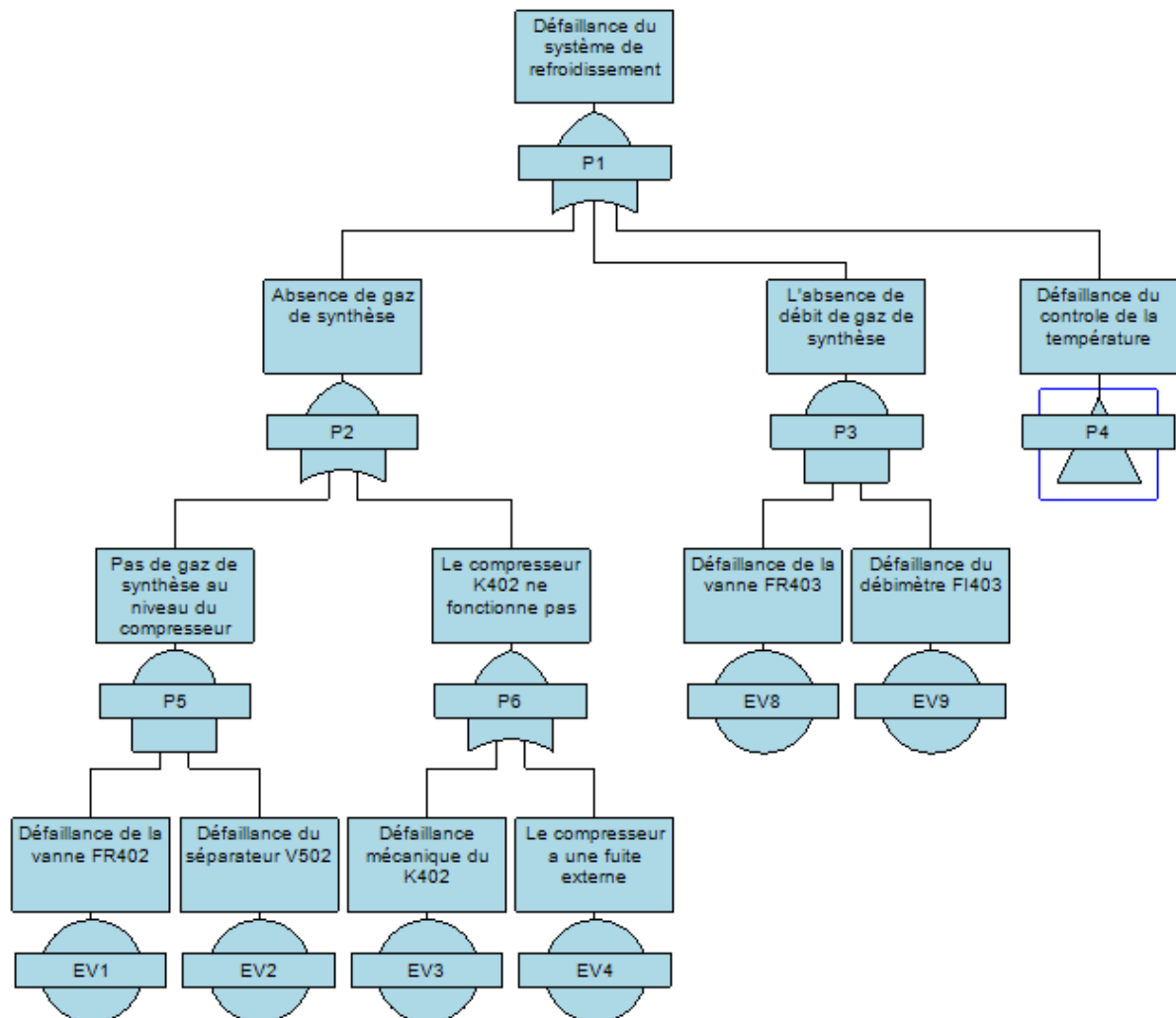


Figure IV-10 L'arbre des défaillances semi-cohérent

La méthode semi-cohérente permet de réduire significativement le temps de calcul requis pour l'analyse des systèmes non-cohérents, tout en conservant une représentation fidèle de leur comportement. Il est généralement admis que deux méthodes principales existent pour l'analyse de ce type de systèmes. La première, fondée sur la table de vérité, vise à identifier les éléments non-cohérents. Bien que rigoureuse, cette approche demeure limitée aux systèmes de petite taille comportant un nombre restreint de composants, tels que le système multitâche.

La seconde méthode, applicable aux systèmes complexes composés d'un grand nombre de composants, repose sur la duplication de chaque composant élémentaire afin de représenter

explicitement ces deux états. Cette modélisation conduit à un arbre des défaillances non-cohérent de grande taille, entraînant une augmentation notable du temps de calcul ainsi qu'un risque accru d'erreurs de modélisation.

Dans ce contexte, la méthode semi-cohérente constitue une alternative efficace, permettant d'identifier les éléments non cohérents sans recourir à une duplication systématique des composants, et offrant ainsi un compromis pertinent entre précision du modèle et efficacité computationnelle.

IV-3-2-3-Les résultats pour l'arbre des défaillances non-cohérent

L'arbre des défaillances non-cohérent est obtenu en inversant l'état de l'élément « La turbine ne fonctionne pas » en « La turbine fonctionne ». Les analyses qualitative et quantitative conduisent à des résultats identiques à ceux de l'arbre des défaillances semi-cohérent, confirmant ainsi le caractère non cohérent du système.

L'évaluation quantitative donne une indisponibilité de $Q = 0,2732$, une fiabilité de $R = 0,7268$ et un temps d'arrêt de 2393 h, traduisant des performances globalement satisfaisantes. Ces résultats montrent que la défaillance du système est due à la combinaison de plusieurs fautes. Une amélioration de la conception, notamment par la redondance des composants critiques, permettra d'accroître la fiabilité et la disponibilité du système, comme cela sera démontré dans les paragraphes suivants. L'ensemble des résultats obtenus est consistant.

Ce modèle de l'arbre des défaillances non-cohérent décrit fidèlement le comportement dysfonctionnel du système étudié. Les composants sont interconnectés par des portes logiques « OU », « ET » et « NOT ». Cette modélisation conduit aux résultats présentés dans les figures IV-9, IV-11 et IV-12.

L'analyse de l'arbre des défaillances non-cohérent commence par une évaluation qualitative dont l'objectif est de déterminer les impliquant premiers et de permettre une évaluation qualitative du système. Les impliquant premiers représentent les combinaisons minimales des événements de base considérés dans leurs deux états, l'état défaillant et l'état fonctionnel, qui conduisent à l'occurrence de l'événement principal.

L'identification de ces impliquant premiers constitue une étape essentielle, car elle permet de localiser les parties du système où des modifications de conception peuvent supprimer ou

réduire les combinaisons indésirables. Elle facilite également la mise en évidence des impliquant premiers contribuant le plus à l'occurrence de l'événement principal.

Afin de faciliter les calculs et de réduire le risque d'erreurs, l'utilisation de logiciels spécialisés permet aux analystes d'étudier des arbres des défaillances complexes avec un temps de calcul réduit et une meilleure fiabilité des résultats. Dans le cadre de cette étude, le logiciel « ISOGRAPH » a été utilisé. L'analyse qualitative a permis d'identifier 17 impliquant premiers dont 14 d'ordre 1, 2 d'ordre 2 et 1 d'ordre 3, le tableau 3 présente la liste complète de tous ces impliquant premiers pour le système de refroidissement du réacteur adiabatique catalytique à lits fixes. Les résultats indiquent que le sous-système 3 est le plus critique, avec 12 impliquant premiers d'ordre 1.

L'analyse qualitative permet de mettre en évidence une faiblesse structurelle au niveau du sous-système de contrôle de température. Il est donc nécessaire de renforcer ce sous-système en identifiant et en améliorant ses composants les plus vulnérables.

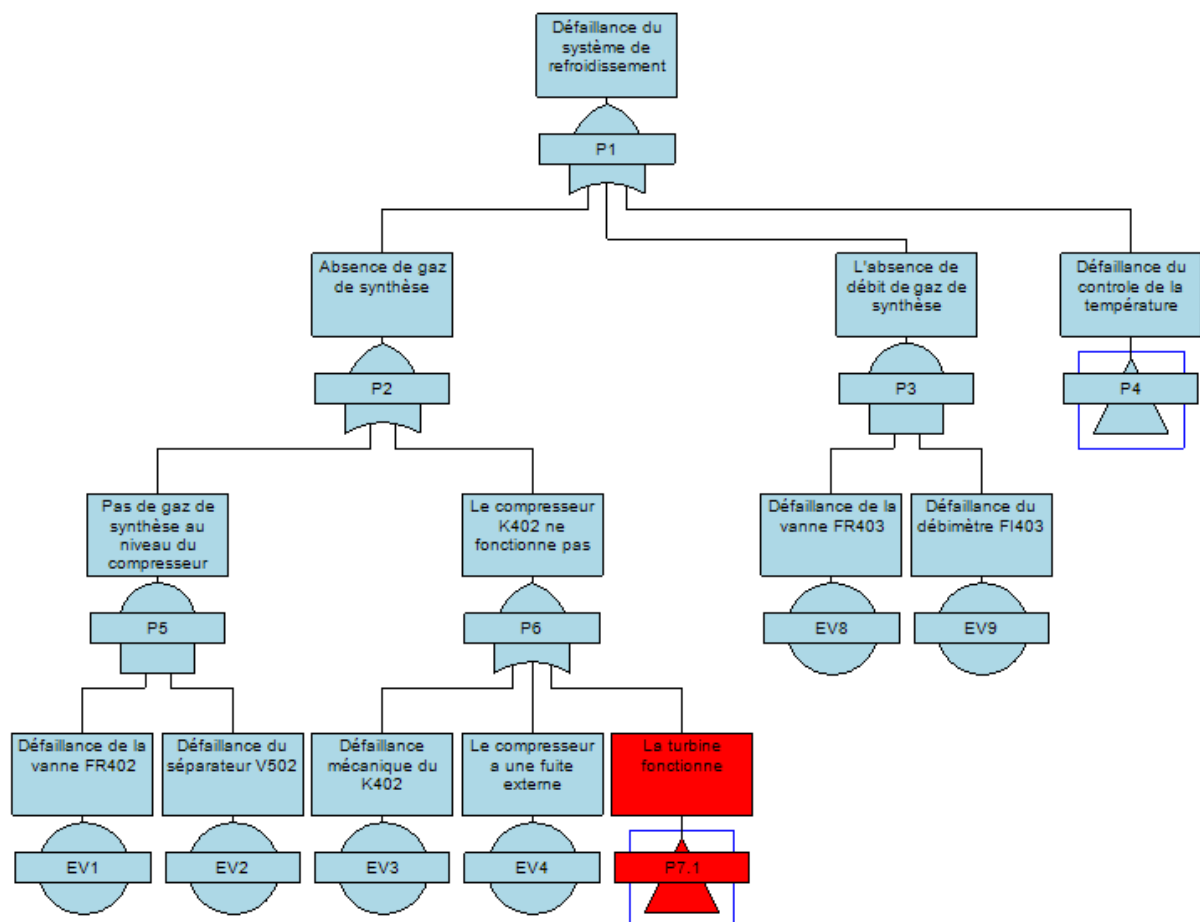


Figure IV-11 L'arbre des défaillances non-cohérent

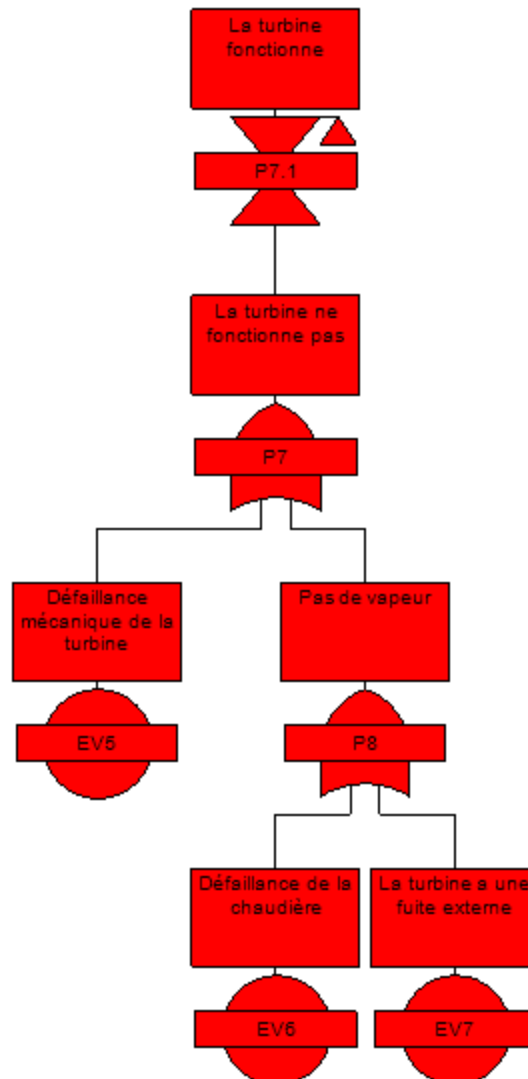


Figure IV-12 Sous-système non-cohérent, la turbine fonctionne

Afin d'approfondir l'analyse du système, une analyse quantitative est menée pour évaluer la probabilité de l'événement principal et celles des sous-systèmes, à partir des probabilités des événements des bases présentées dans le tableau IV-1. Ces probabilités sont propagées vers le sommet de l'arbre à l'aide des relations booléennes décrites au chapitre II. Ce processus de propagation permet de déterminer les paramètres globaux du système tels que la fiabilité, l'indisponibilité, l'intensité de défaillances inconditionnelles et le nombre prévu de défaillances.

La compréhension de ces paramètres permet d'améliorer le système et d'orienter la prise de décision. Pour le système « Panne de refroidissement », les résultats de l'analyse quantitative détaillée sont présentés dans le tableau 3. La colonne 2 indique la fiabilité R de chaque sous-système, la colonne 3 l'indisponibilité Q, la colonne 4 l'intensité de défaillance inconditionnelle W (t), le temps d'arrêt prévu sur dix ans est présenté dans la colonne 5 et la colonne 6 présente le nombre total d'heures pendant lesquelles les sous-systèmes seront indisponibles au cours des dix prochaines années (87 600 h) W (t₀, t).

La dernière colonne présente le classement des sous-systèmes en fonction de leur indisponibilité. Le sous-système 3 (contrôle de la température) affiche l'indisponibilité la plus élevée, égale à 0,251, ce qui indique qu'il constitue l'entité la plus critique du système. Cette indisponibilité élevée est encore confirmée par le nombre de pannes prévues sur une période de 10 ans, estimé à 2,17.

L'analyse quantitative montre que le système présente une indisponibilité Q = 0,2732, correspondant à une disponibilité A = 0,7268. Sur une période d'un an (8760 h). Cela signifie que le système est indisponible pendant environ 2393 h (27.32%) et disponible durant 6367 h (72.68%). Ces résultats confirment que, bien que le système fonctionne correctement la majeure partie du temps, il existe des périodes de défaillance à prendre en compte dans l'amélioration du système.

Tableau IV-3 les résultats de l'analyse qualitative

Les sous-systèmes	Les impliquant premiers (IP)	Nombre IP d'ordre 1	Nombre IP d'ordre 2	Nombre IP d'ordre 3	Classement
Absence de gaz de synthèse	EV3 ; EV4 ; (EV1 ;EV2) ; (EV6; EV7; - EV5);	2	1	1	2
Absence du débit de gaz de synthèse	(EV8; EV9)	0	1	0	3
Contrôle de la température	EV10 ;EV11, EV12, EV13, EV14, EV15, EV16, EV17; EV18; EV19; EV20; EV21	12	0	0	1

Tableau IV-4 Les résultats de l'analyse quantitative pour une période de 10 ans

Sous-système	R	Q	W(t)	Le temps d'arrêt pour une période de 10 ans	W(t ₀ ,t)	Classement
Absence de gaz de synthèse	0.7177	0.02938	$3.675 \cdot 10^{-6}$	2574 h	0.3219	2
Absence du débit de gaz de synthèse	0.9956	$22.38 \cdot 10^{-5}$	$5.058 \cdot 10^{-8}$	19.61 h	0.00433	3
Contrôle de la température	0.0555	0.251	$2.5 \cdot 10^{-5}$	21990 h	2.17	1

Par ailleurs, la défiabilité du système est $F = 0.2758$, ce qui correspond à une fiabilité $R = 0.7242$. Autrement dit, le système est susceptible de subir des défaillances pendant environ 2416 h par an (27,58 % du temps) et reste fiable pendant 6344 h par an (72,42 % du temps).

La comparaison des indisponibilités des trois sous-systèmes montre que le sous-système 3 (Contrôle de la température) présente l'indisponibilité la plus élevée, $Q = 0,251$ et constitue le principal contributeur à la défaillance du système de refroidissement. Ces résultats indiquent qu'une amélioration de l'indisponibilité du sous-système 3 est nécessaire afin d'accroître les performances globales du système.

Le sous-système 3 présente un temps d'arrêt cumulé de 21990 h et un total d'heures d'indisponibilité de 2,17 sur une période de dix ans. Cela se traduit par un temps d'indisponibilité d'environ 25,1 h pour 100 h de fonctionnement. Cette indisponibilité importante met en évidence la nécessité de mettre en place des stratégies de maintenance adaptées ainsi qu'une révision de la conception du système de refroidissement.

En outre, l'analyse quantitative permet d'identifier les composants les plus influents sur l'indisponibilité du système. Ces composants critiques sont déterminés à l'aide des facteurs d'importance. Ces facteurs permettent de classer quantitativement les éléments en fonction de leur contribution à l'indisponibilité globale. Les résultats de cette analyse sont présentés dans le tableau 5, lequel met en évidence l'apport des facteurs d'importance de Birnbaum et de Fussell-

Vesely dans le contexte du système de refroidissement d'un réacteur catalytique adiabatique à lits fixes.

Tableau IV-5 Les facteurs d'importance

Evènement	Fussell-Vesely	Birnbaum	Evènement	Fussell-Vesely	Birnbaum
EV10	0.1483	1	EV21	0.02171	1
EV13	0.1483	1	EV15	0.02171	1
EV19	0.1483	1	EV18	0.02171	1
EV16	0.1483	1	EV9	0.0007135	0.03418
EV17	0.05618	1	EV8	0.0007135	0.006548
EV14	0.05618	1	EV1	0.0002025	0.009329
EV11	0.05618	1	EV2	0.0002025	0.0081
EV20	0.05618	1	EV5	-0.0001349	-0.0005396
EV3	0.04629	1	EV6	0.0001754	-0.0005523
EV4	0.04629	1	EV7	-2.643	-0.8298
EV12	0.02171	1			

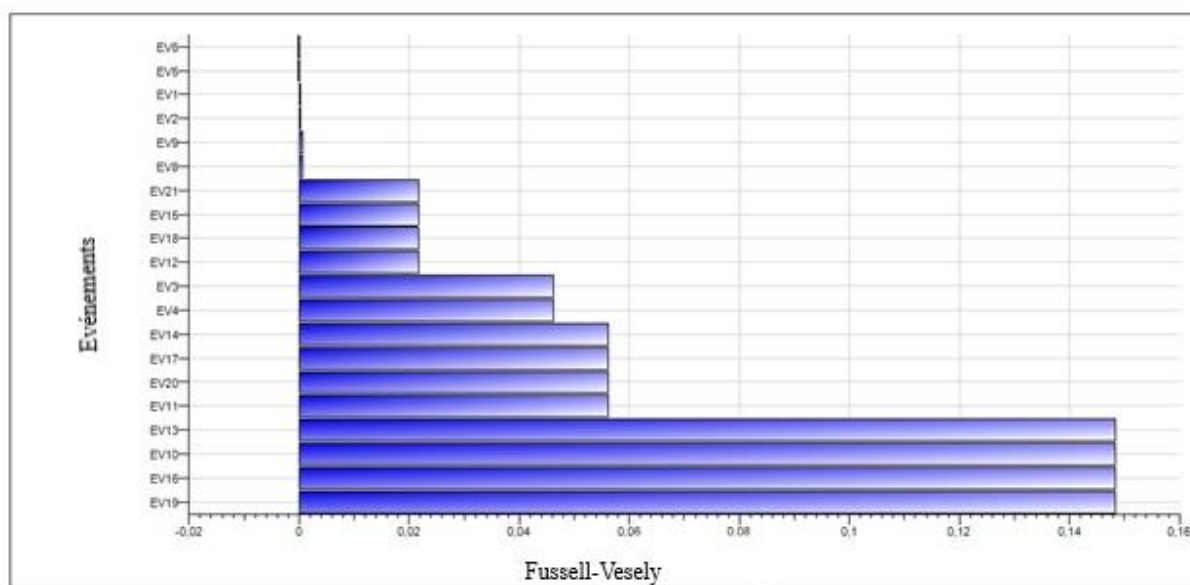


Figure IV-13 Les facteurs d'importance de Fussell-Vesely

L'analyse du tableau IV-5 montre que le facteur d'importance de Fussell-Vesely classe les événements selon leur contribution à la défaillance du système. Les composants ainsi identifiés comme les plus critiques sont les vannes de régulation TRC501, TRC502, TRC503, et TRC504, les capteurs de température ST541, ST542, ST543, ST544, et ainsi que les alarmes TIAH1, TIAH2, TIAH3, TIAH4, tous appartenant au système de contrôle de température. À ces éléments s'ajoutent la défaillance mécanique du compresseur et la fuite externe du compresseur. Ces résultats sont détaillés dans le tableau IV-6 et la figure IV-13

Tableau IV-6 Classement des principaux composants critiques

Les composants	Evènement	Fussell-Vesely	Classement
La vanne de régulation du lit1 (TRC501)	EV10	0.1483	1
La vanne de régulation du lit2 (TRC502)	EV13	0.1483	1
La vanne de régulation du lit3 (TRC503)	EV16	0.1483	1
La vanne de régulation du lit4 (TRC504)	EV19	0.1483	1
Le capteur de température pour le lit1(ST541)	EV11	0.05618	2
Le capteur de température pour le lit2 (ST542)	EV14	0.05618	2
Le capteur de température pour le lit3 (ST543)	EV17	0.05618	2
Le capteur de température pour le lit4 (ST544)	EV20	0.05618	2
Défaillance mécanique du compresseur K402	EV3	0.04629	3
Fuite externe du compresseur K402	EV4	0.04629	3
L'alarme du lit1 (TIAH1)	EV12	0.02171	4
L'alarme du lit2 (TIAH2)	EV15	0.02171	4
L'alarme du lit3 (TIAH3)	EV18	0.02171	4
L'alarme du lit4 (TIAH4)	EV21	0.02171	4

IV-4 La variation de la conception du système

Les résultats montrent que le système présente des performances satisfaisantes pour une période d'un an. Toutefois, lorsque l'évaluation est étendue à dix ans, la défiabilité du système augmente fortement pour atteindre $F = 0.96$, traduisant une fiabilité très faible, $R = 0.04$. L'amélioration des performances du système nécessite donc des modifications de conception ou de stratégie de maintenance. L'analyse révèle que l'ajustement de l'intervalle d'inspection est inefficace, tandis que la redondance des composants critiques permet d'améliorer significativement les performances du système.

Pour améliorer la conception du système, la redondance du compresseur du sous-système 1, absence de gaz de synthèse, des vannes de régulation, des capteurs et des alarmes du sous-système 3, le contrôle de la température est effectué et les nouveaux paramètres après redondance sont illustrés au tableau IV-7.

Tableau IV-7 Les paramètres du système après modification de la conception

Paramètres	code	Une année	Dix ans
La défiabilité	F	0.025	0.227
La fiabilité	R	0.975	0.773
L'indisponibilité	Q	0.012	0.012
La disponibilité	A	0.988	0.988

Tableau IV-8 L'analyse quantitative après modification de la conception

Sous-système	R	Q	W(t)	Le temps d'arrêt pour 10 ans (h)	W (t_0 , t)
Absence de gaz de synthèse	0.946	$1.39 \cdot 10^{-5}$	$6.331 \cdot 10^{-7}$	121.9	0.05543
Absence du débit de gaz de synthèse	0.996	$22.38 \cdot 10^{-5}$	$5.058 \cdot 10^{-8}$	19.6	0.00433
Contrôle de la température	0.83	0.01	$2.24 \cdot 10^{-6}$	880.3	0.1959

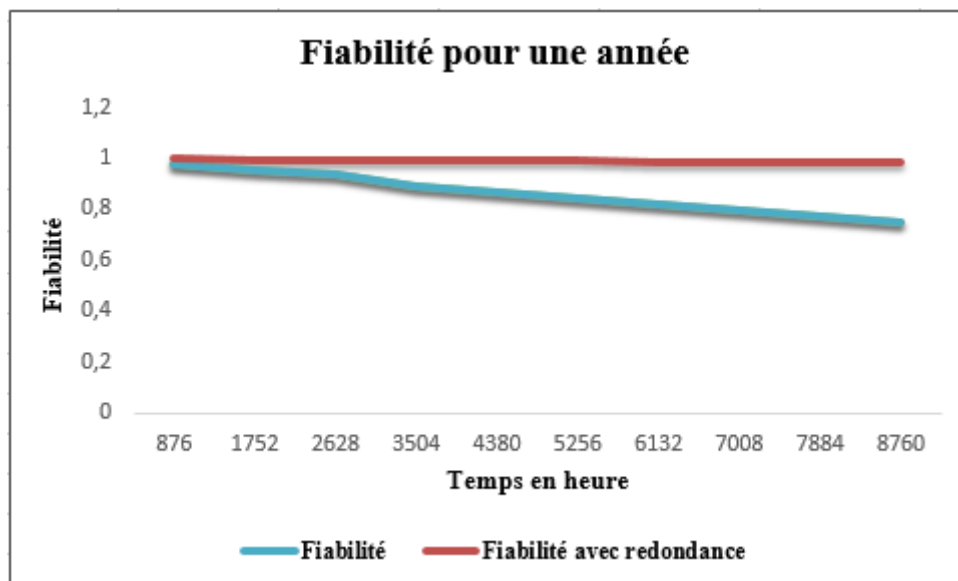


Figure IV-14 La fiabilité pour une année

Les résultats de l'analyse quantitative après redondance sont présentés dans le tableau IV-8. Il récapitule, pour chaque sous-système, la fiabilité R , l'indisponibilité Q , l'intensité de défaillance inconditionnelle $W(t)$, le temps d'arrêt prévu sur dix ans, et le nombre total d'heures d'indisponibilité sur la période considérée $W(t_0, t)$.

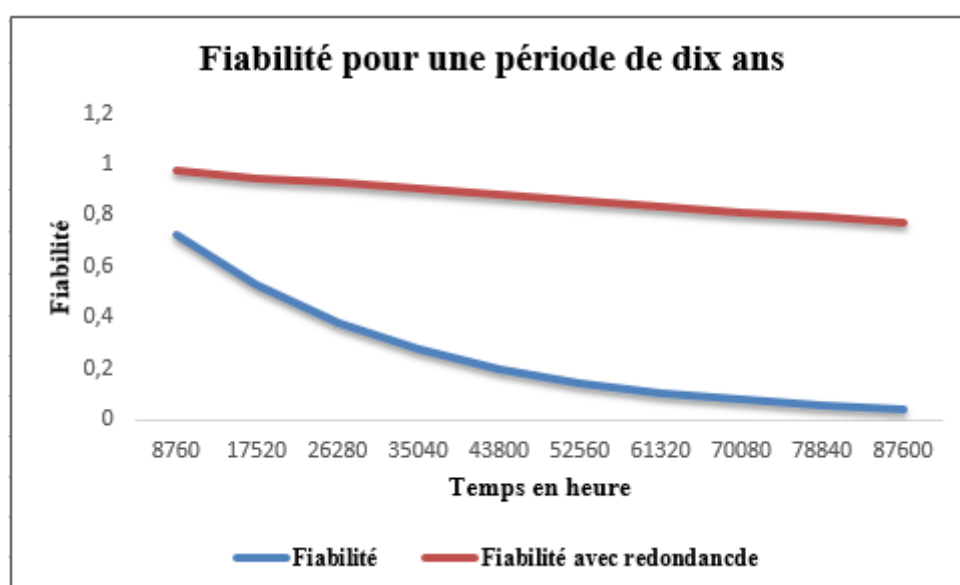


Figure IV-15 La fiabilité pour une période de dix ans

La modification de la conception montre une amélioration significative des performances du système. La fiabilité annuelle augmente de 0.72 à 0.98 comme illustré à la figure IV-14, et sur dix ans, passe de 0.04 à 0.77 comme le montre la figure 16, tandis que l'indisponibilité diminue de 0.27 à 0.012. Cette amélioration se traduit par une réduction du temps d'arrêt cumulé de 23930 h à 1020 h sur la décennie et par un nombre de pannes prévu limité à 0.19.

IV-5- La méthode classique de l'arbre des défaillances non-cohérent

La méthode classique d'analyse des arbres des défaillances non-cohérents repose sur la duplication systématique des événements de base afin de permettre la construction de l'arbre correspondant. Dans le cadre de l'analyse du système de refroidissement du réacteur adiabatique catalytique à lits fixes, les figures suivantes présentent les résultats obtenus à partir de cette approche et servent de références pour évaluer les performances de la méthode proposée.

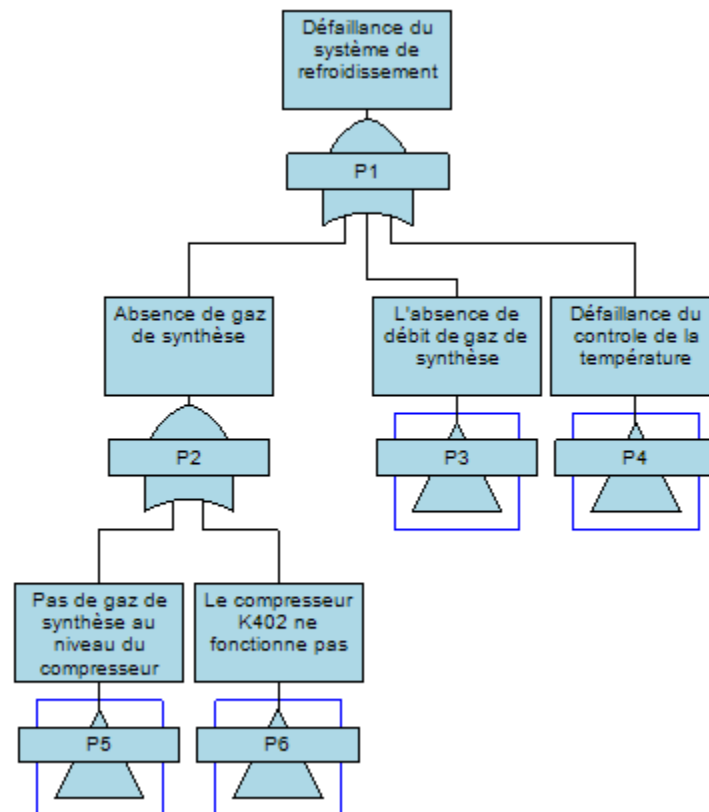


Figure IV-16 L'arbre des défaillances non-cohérent global

La construction d'un arbre des défaillances non-cohérent à partir d'un arbre des défaillances cohérent consiste à intégrer, en complément des états de défaillance, l'ensemble des états fonctionnels des composants. L'utilisation de la porte logique « NOT » contribue ainsi à une augmentation significative de la quantité d'information disponible sur le comportement du système. (Hurdle, 2008).

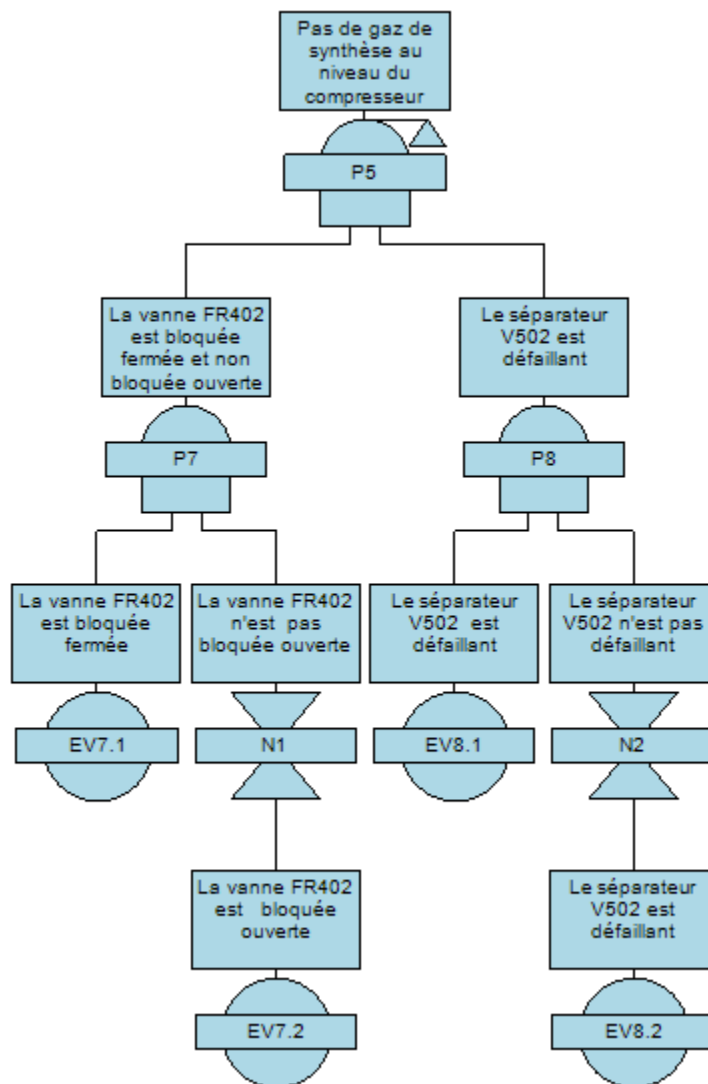


Figure IV-17 L'arbre des défaillances non-cohérent pour le transfert P5 « pas de gaz de synthèse au niveau du compresseur »

La cause de l'évènement « pas de gaz au niveau du compresseur » est le résultat de l'absence de gaz de synthèse en amont de la vanne FR402. Cette situation est due à une défaillance du

séparateur et un blocage en position fermée de la vanne. Lorsque la vanne FR402 est bloquée en position fermée, elle ne peut simultanément être bloquée en position ouverte ; cet état correspond donc un état contraire à l'état défaillant. Etant donné qu'un composant ne peut se trouver que dans un seul état à un instant donné, l'état fonctionnel de la vanne FR402 correspond à sa position ouverte, y compris le cas où elle est bloquée en position ouverte.

Le même raisonnement est applicable à toutes les autres vannes du système, en considérant pour chacune d'elles les états défaillants et les états fonctionnels correspondants.

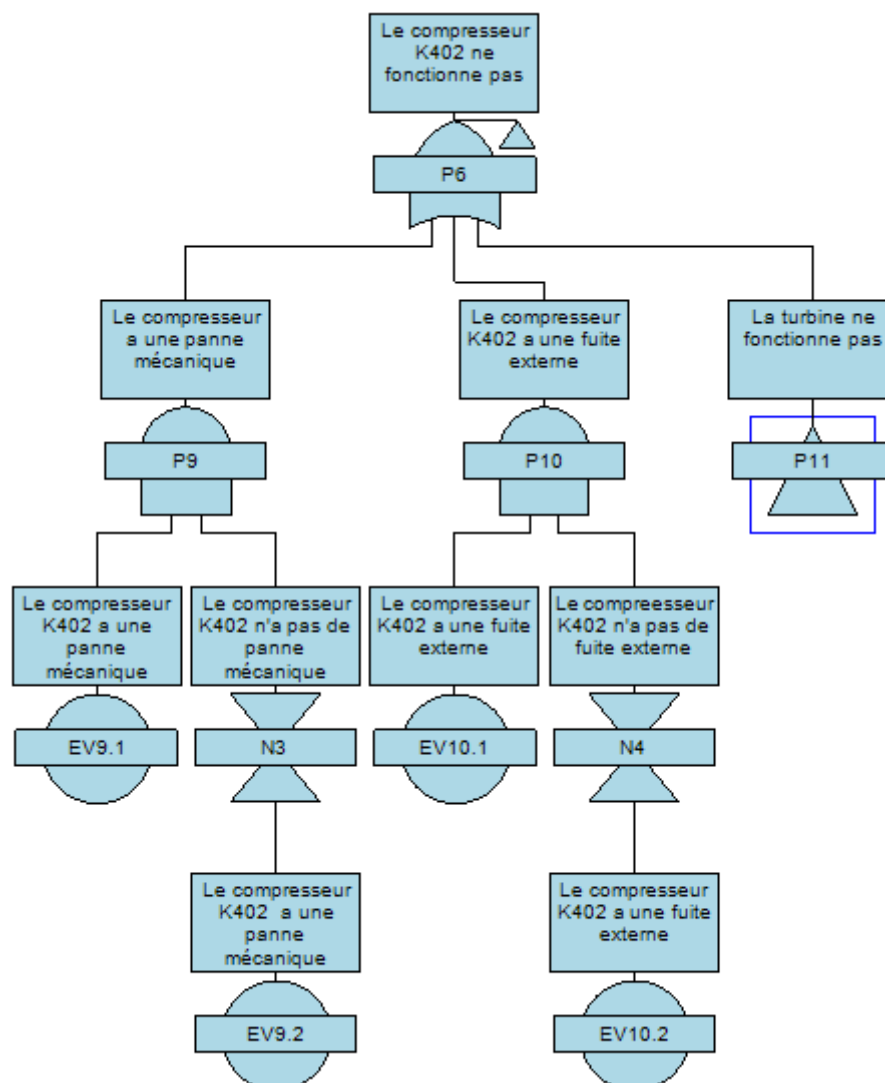


Figure IV-18 L'arbre des défaillances non-cohérent pour le transfert P6 « Le compresseur K402 ne fonctionne pas »

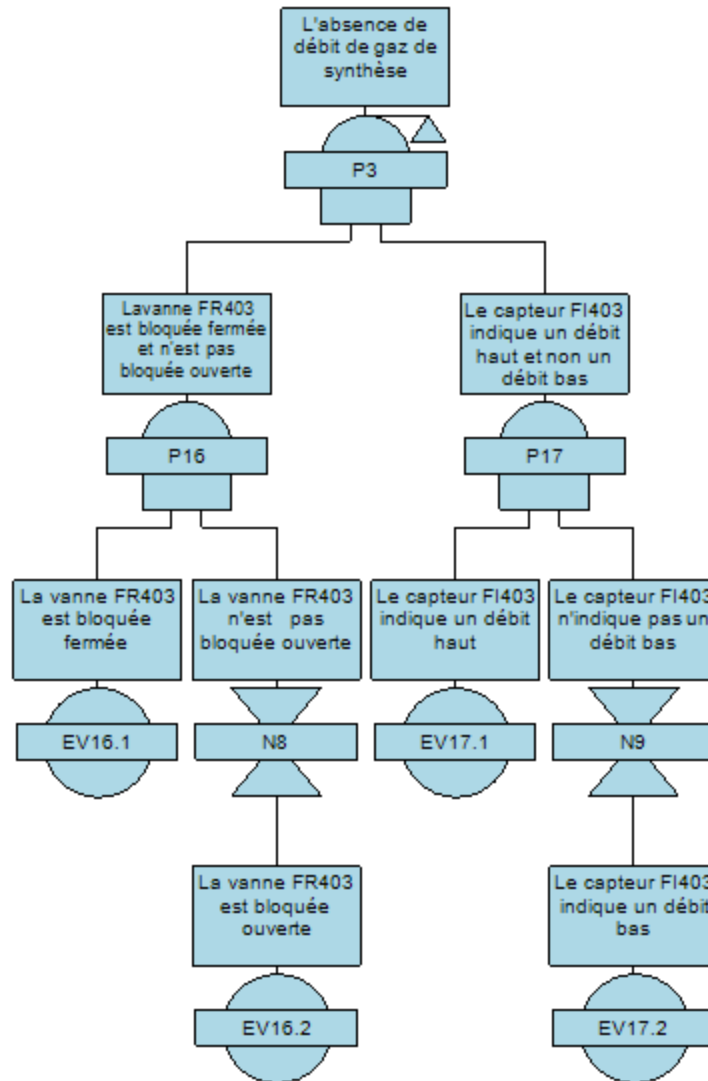


Figure IV-19 L'arbre des défaillances non-cohérent pour le transfert P3 « l'absence de débit de gaz de synthèse »

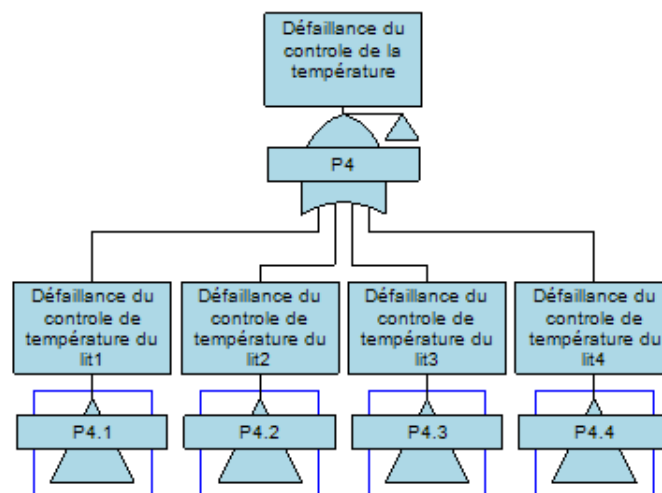


Figure IV-20 L'arbre des défaillances non-cohérent pour le transfert P4 « Défaillance du contrôle de température »

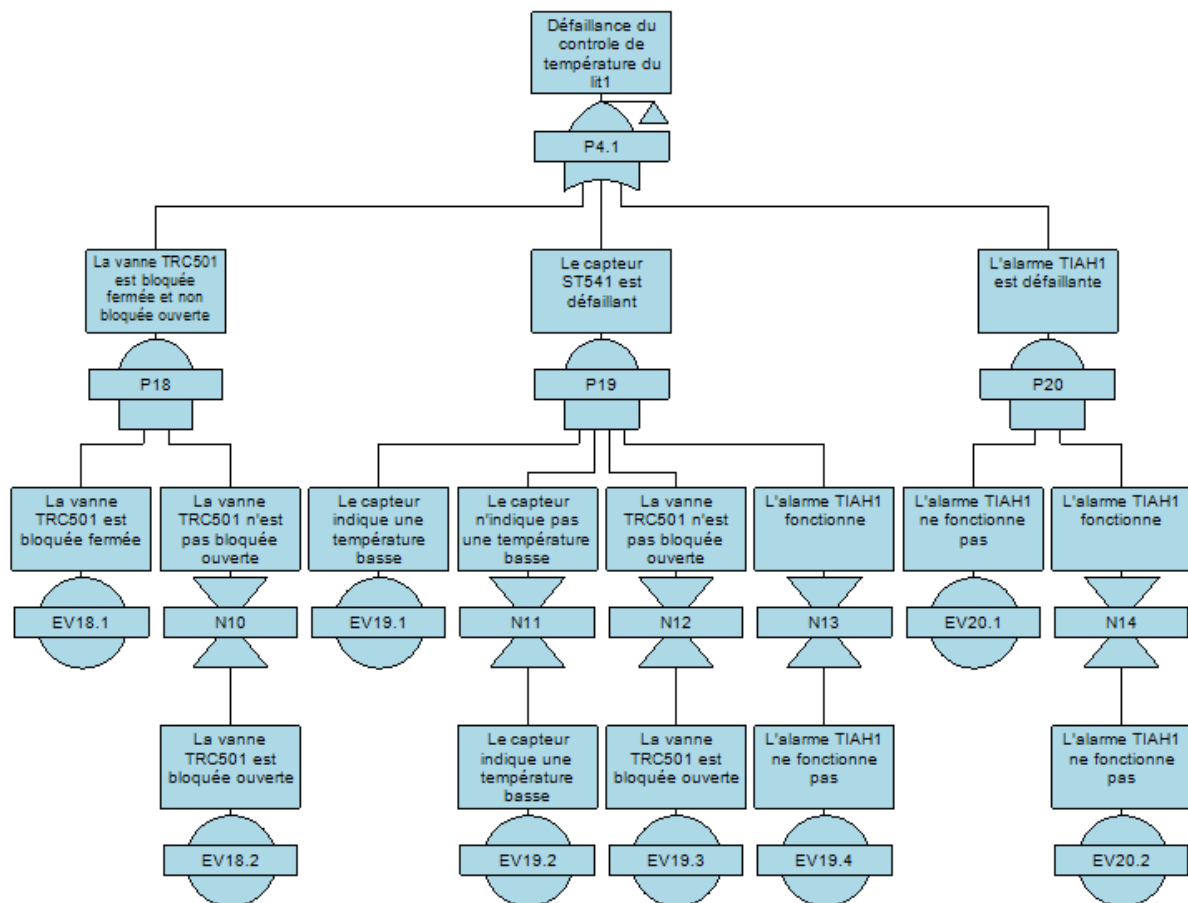


Figure IV-21 L'arbre des défaillances non-cohérent pour le lit 1

Le passage du gaz de synthèse à travers les vannes TRC501, TR502, TRC503 et TRC504 est empêché lorsque celles-ci sont bloquées en position fermée, ou lorsque les capteurs ST541, ST542, ST543 et ST544 indiquent un niveau de température bas. Ces capteurs assurent la commande des vannes de régulation ainsi que le déclenchement des alarmes. En présence d'élévation de la température, ils ordonnent l'ouverture des vannes afin d'augmenter le débit de gaz de quench et déclenchent simultanément les alarmes pour signaler l'anomalie aux opérateurs.

Dans le cadre d'une modélisation non-cohérente, lorsque les capteurs indiquent un niveau de température bas, ils ne peuvent pas simultanément indiquer un niveau élevé ; cet état constitue donc l'état contraire à l'état défaillant. Par conséquent, les vannes associées ne peuvent être qu'ouvertes ou bloquées ouvertes, ce qui correspond à un état fonctionnel. De même les alarmes sont considérées comme fonctionnelles, puisqu'aucun signal n'est transmis par les capteurs.

Ce cas ne s'applique pas au capteur de débit FI403, dans la mesure où celui-ci ne commande pas la vanne FR403.

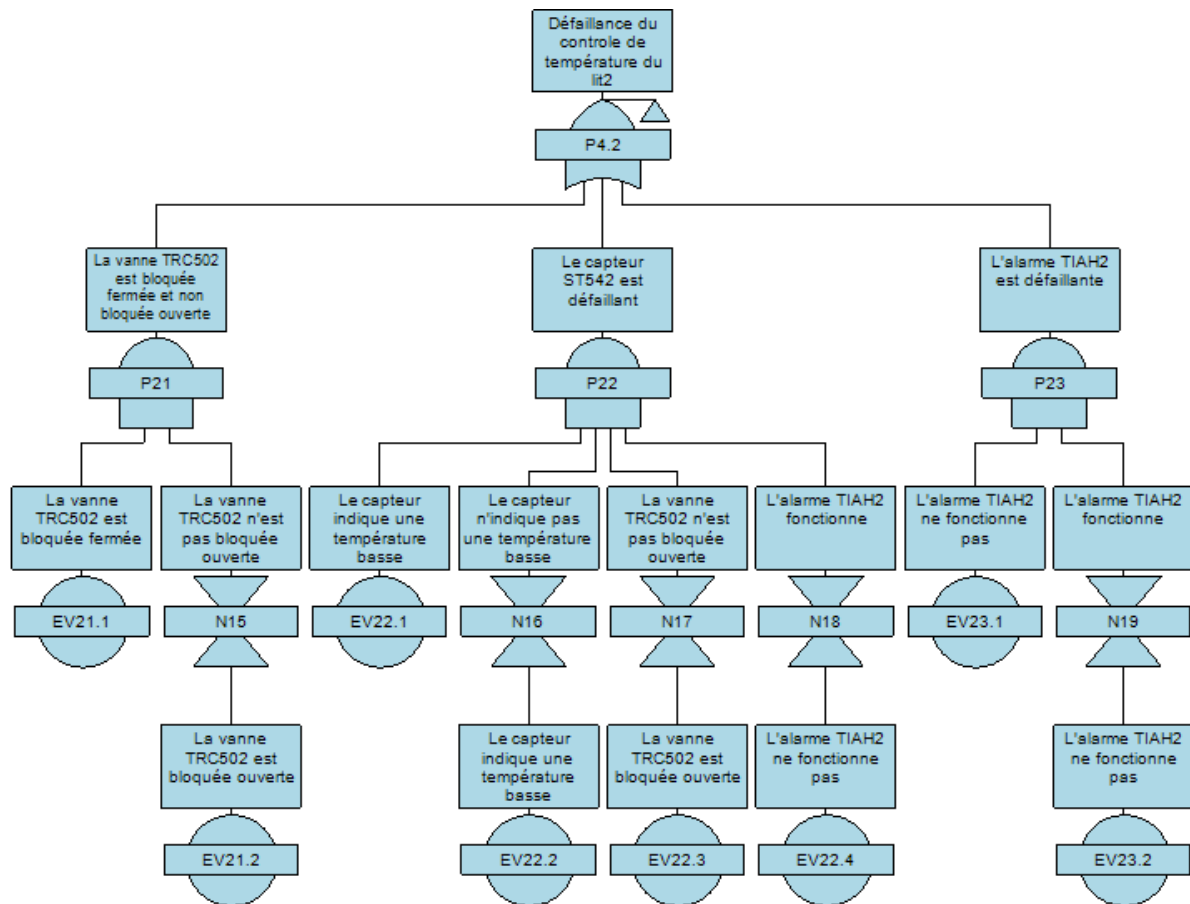


Figure IV-22 L'arbre des défaillances non-cohérent pour le lit 2

L'analyse qualitative de l'arbre des défaillances classique donne 19 impliquant premiers, dont 13 d'ordre 2 {(-EV9.2, EV9.1) ; (-EV10.2, EV10.1) ; (-EV12.2, EV12.1) ; (-EV14.2, EV14.1) ; (-EV15.2, EV15.1), (-EV18.2, EV18.1), (-EV20.2, EV20.1), (-EV21.2, EV21.1), (-EV23.2, EV23.1), (-EV24.2, EV24.1), (-EV26.2, EV26.1), (-EV27.2, EV27.1), (-EV29.2, EV29.1)} et 6 d'ordre 4 {(-EV7.2, EV7.1.-EV8.2.EV8.1), (-EV16.2.EV16.1, -EV17.EV17.1), (-EV19.2, -EV19.3.-EV19.4.EV19.1), (-EV22.2.-EV22.3.-EV22.4.EV22.1), (-EV25.2.-EV25.3, -EV25.4.EV25.1), (-EV28.2.-EV28.3.EV28.4.EV28.1)}.

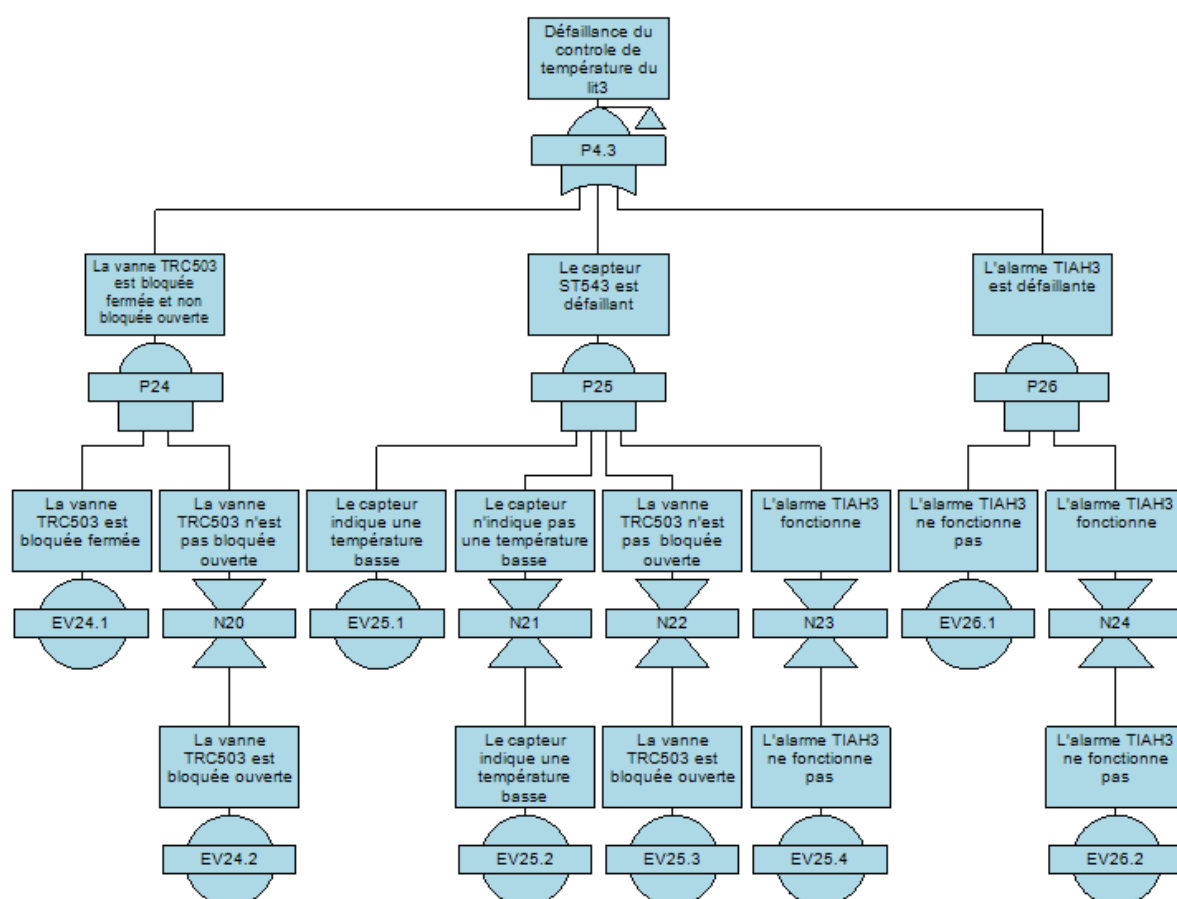


Figure IV-23 L'arbre des défaillances non-cohérent pour le lit 3

Tableau IV-9 Analyse qualitative de l'arbre des défaillances non-cohérent classique

Les sous-systèmes	Les impliquant premiers (IP)	NI P 2	NI P 4	Cla
Absence de gaz de synthèse	{(-EV9.2, EV9.1); (-EV10.2, EV10.1); (-EV12.2, EV12.1); (-EV14.2, EV14.1); (-EV15.2, EV15.1)} {(EV7.2.EV7.1.EV8.2.EV8.1)}	5	1	2
Absence du débit de gaz de synthèse	{(-EV16.2.EV16.1.-EV17.EV17.1)}	0	1	3
Contrôle de la température	{(-EV18.2, EV18.1); (-EV20.2, EV20.1); (-EV21.2, EV21.1); (-EV23.2, EV23.1); (-EV24.2, EV24.1); (-EV26.2, EV26.1); (-EV27.2, EV27.1); (-EV29.2, EV29.1)}; {(-EV19.2.-EV19.3.-EV19.4.EV19.1); (-EV22.2.-EV22.3.-EV22.4.EV22.1); (-EV25.2.-EV25.3.-EV25.4.EV25.1); (-EV28.2.-EV28.3.EV28.4.EV28.1)}	8	4	1

NIP2 désigne le nombre d'impliquant premiers d'ordre 2, tandis que NIP4 correspond au nombre d'impliquant premiers d'ordre 4. Le paramètre **Cla** représente le classement associé.

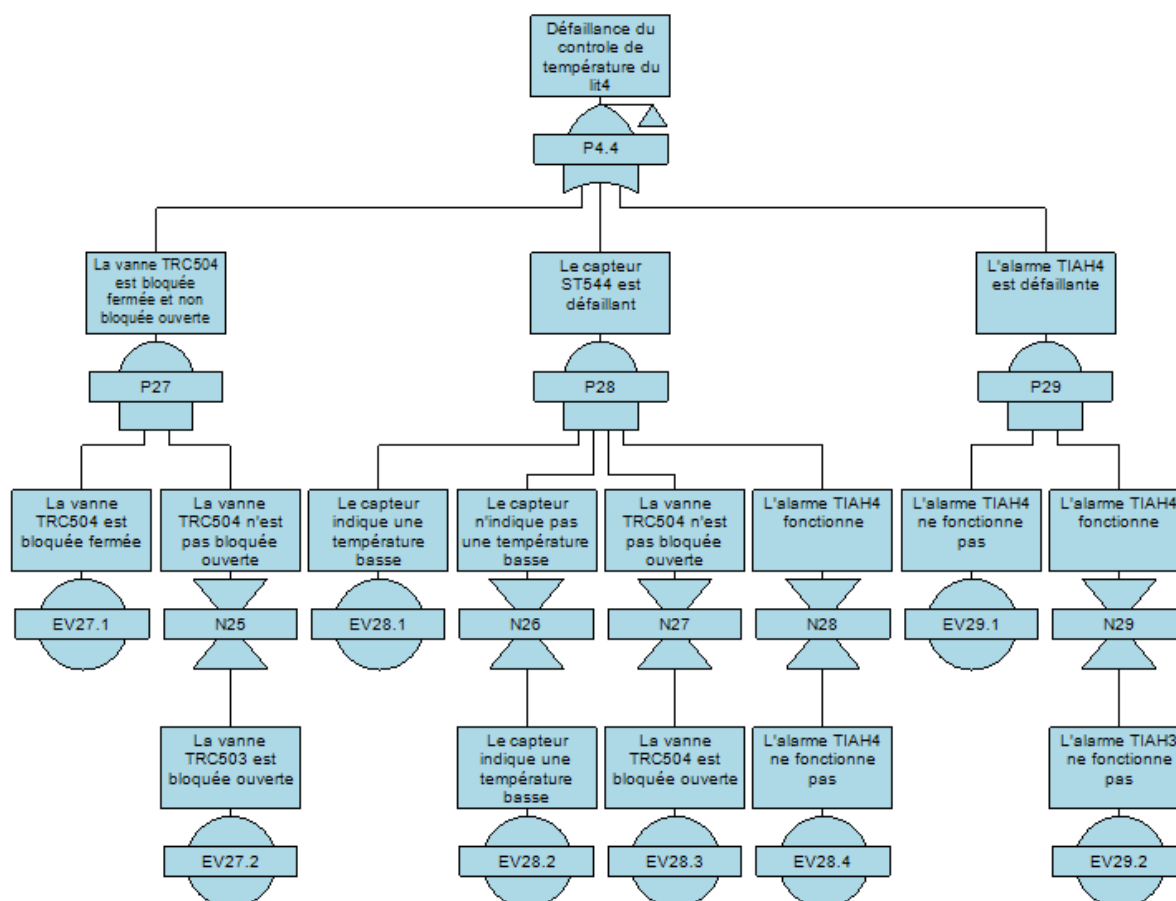


Figure IV-24 L'arbre des défaillances non-cohérent pour le lit 4

La comparaison entre les deux méthodes met en évidence une différence significative. Alors que la méthode classique conduit à la génération de 50 événements de base, la méthode semi-cohérente n'en produit que 21, soit une réduction de 29 événements correspondant à une réduction de 58% de la taille du modèle. Cette diminution se traduit par une réduction du temps de calcul, estimée à peu près de la moitié, ainsi que par une forte simplification de la structure logique, le nombre de portes logiques « NOT » passant de 29 à une seule. Le tableau suivant présente une synthèse comparative des deux méthodes.

Tableau IV-10 Comparaison entre les deux méthodes

Les méthodes	Nombre d'événement de base	Nombre de portes NOT	Temps de calcul
La méthode classique	50	29	lente
La nouvelle méthode	21	1	rapide

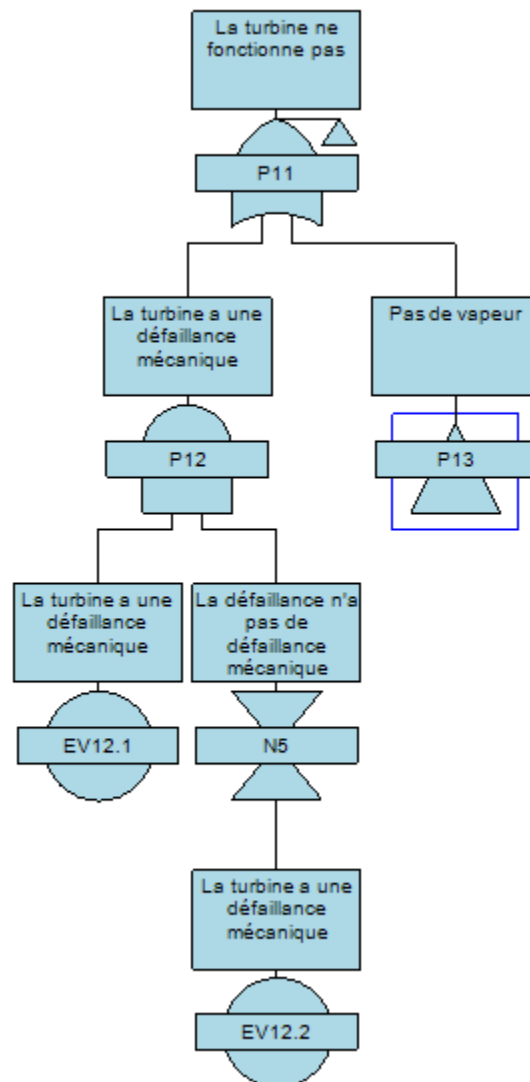


Figure IV-25 L'arbre des défaillances non-cohérent « La turbine fonctionne »

Les deux méthodes conduisent à des résultats identiques en analyse quantitative. Toutefois, l'analyse classique mobilise un nombre plus important de facteurs d'importance, sans pour autant apporter d'informations supplémentaires par rapport à la méthode semi-cohérente, laquelle permet d'obtenir les mêmes conclusions avec une structure de modèle plus compacte et un effort de calcul réduit.

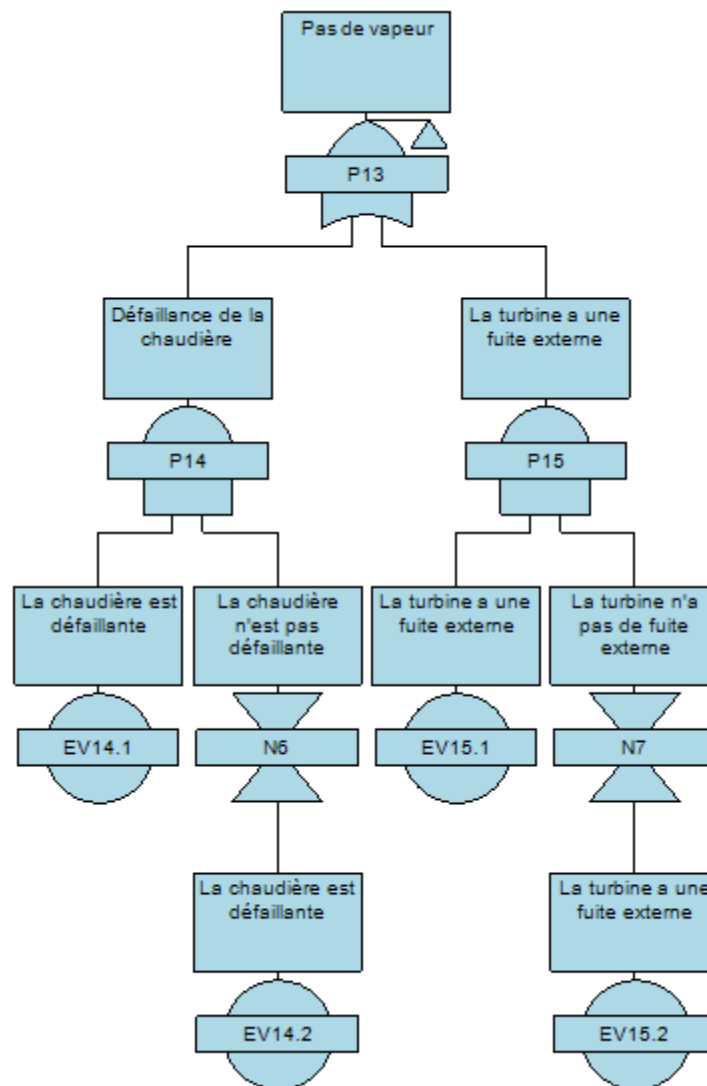


Figure IV-26 L'arbre des défaillances non-cohérent du transfert « pas de vapeur »

IV-6- Conclusion

La méthode proposée permet d'assurer le passage d'un arbre de défaillances cohérent vers celui non-cohérent en identifiant les parties non-cohérentes du système. Ces parties sont ensuite inversées afin de permettre la construction de l'arbre non-cohérent. La méthode semi-cohérente constitue ainsi une approche intermédiaire entre les deux méthodes classiques, dont l'objectif principal est de simplifier la modélisation de l'arbre des défaillances non-cohérent par la détection préalable des parties non-cohérentes du système.

Cette approche repose sur l'analyse des résultats issus de l'arbre des défaillances cohérent représentant le système. Lorsque les résultats obtenus sont en contradiction avec le comportement attendu, les facteurs d'importance sont évalués afin d'identifier le composant

le plus critique. Ce composant est réparé ; si cette action ne permet pas de rétablir le système dans un état fonctionnel, il est identifié comme un composant non-cohérent. Ce processus est itérativement répété jusqu'à l'identification de l'ensemble des composants dont le comportement est opposé à celui du système.

Une fois les composants non-cohérents sont identifiés, l'arbre des défaillances non-cohérent est construit, l'analyse quantitative associée permet ensuite de déterminer les composants à améliorer en vue d'optimiser les performances et la sûreté du système.

La comparaison avec la modélisation classique d'un arbre des défaillances non-cohérent met en évidence l'efficacité de la méthode semi-cohérente proposée, qui permet d'aboutir à des résultats équivalents tout en réduisant significativement la complexité du modèle et le temps de calcul.

Conclusion générale et perspectives

L'emballlement thermique constitue une conséquence directe d'un déséquilibre entre la chaleur générée par la réaction chimique au sein d'une enceinte fermée et celle évacuée par le système de refroidissement dont la mission est de protéger le réacteur contre toute élévation de température dépassant un seuil fixé par le concepteur. Toute défaillance de ce système peut entraîner des conséquences majeures sur la sûreté de l'installation. Il apparaît donc essentiel d'assurer en permanence la fiabilité du système de refroidissement à travers des analyses de fiabilité rigoureuses et des stratégies de maintenance prédictive, permettant d'identifier précocement les anomalies et les composants critiques susceptibles de compromettre le fonctionnement global du système.

L'analyse de la fiabilité peut être menée à l'aide de plusieurs méthodes, parmi lesquelles l'arbre des défaillances constitue l'une des plus importantes. Cet outil représente un support essentiel pour l'évaluation des risques et l'aide à la prise de décision, notamment en vue d'améliorer les performances du système ou d'adapter la politique de sa maintenance. Initialement développé pour évaluer et renforcer la fiabilité du système de lancement du missile balistique intercontinental, l'arbre des défaillances a vu son champ d'application s'élargir et évoluer progressivement au fil du temps. Il est aujourd'hui largement adopté par de nombreux domaines, qu'ils soient industriels, tels que la chimie et la pétrochimie, ou non industriels, comme le domaine médical. Il constitue désormais un outil incontournable pour l'évaluation des systèmes complexes.

L'objectif de l'arbre des défaillances est d'identifier les événements susceptibles de provoquer des défaillances majeures et d'analyser les causes des accidents afin de garantir la sécurité, la fiabilité et la disponibilité des installations. En d'autres termes, l'analyse par arbre des défaillances (Fault Tree Analysis, FTA) ne se limite pas à la recherche de la cause racine, mais permet également de réaliser une évaluation approfondie des risques.

Par ailleurs, la complexité croissante des systèmes industriels modernes a conduit au développement d'extensions de l'arbre des défaillances cohérent, parmi lesquelles figurent l'arbre des défaillances non-cohérent. Ce dernier se caractérise par l'introduction de la porte logique « NOT », qui permet d'inverser l'état d'un composant ou d'un sous-système lorsque celui-ci adopte un comportement contraire à celui du système global. Ainsi, lorsque le système est opérationnel, l'entité considérée est en état de défaillance, et inversement, lorsque le système est défaillant, l'entité est fonctionnelle.

L'arbre des défaillances non-cohérent est classiquement construit en dupliquant les éléments du système en deux états distincts : un état défaillant (x_i) et un état fonctionnel ($\bar{x}_i$). Cette approche conduit généralement à un arbre de grande taille et un temps de calcul accru. Afin de contourner cette difficulté, l'arbre des défaillances semi-cohérent a été développé pour identifier uniquement les éléments non-cohérents du système et construire l'arbre non-cohérent en inversant l'état de ces éléments par l'introduction de la porte logique « NOT ». Cette stratégie permet de réduire significativement la taille de l'arbre ainsi que le temps de calcul associé.

Dans le cas de cette thèse, l'utilisation de l'arbre des défaillances semi-cohérent a permis de réduire significativement la complexité de la modélisation non-cohérente. En effet, le nombre d'événements de base a été ramené de 50 à 21, soit une réduction de 58%. Cette diminution se traduit par un gain de calcul considérable, tant pour l'analyse qualitative que pour l'analyse quantitative tout en préservant la précision des résultats obtenus.

La méthode proposée constitue ainsi un outil efficace et pragmatique pour les analystes de sûreté et les ingénieurs de sécurité industrielle et environnementale, en facilitant la construction et l'évaluation des arbres des défaillances non-cohérents. Elle permet notamment de cibler de manière systématique les composants dont le comportement est contraire à celui du système global, évitant ainsi une modélisation exhaustive et coûteuse en temps.

Néanmoins, certaines limites doivent être soulignées. Lorsque le système étudié comporte un nombre élevé de composants non cohérents, le processus itératif d'identification peut devenir relativement lent et nécessite plusieurs cycles d'évaluation successifs. Ces limitations ouvrent des perspectives de recherche futures, notamment le développement de critères de convergence plus performants ainsi que l'intégration de techniques d'optimisation et d'intelligence artificielle telles que les réseaux bayésiens et les réseaux de Petri afin d'améliorer l'efficacité globale et la robustesse de la méthode.

La Bibliographie

A

- Ab Rahim, M.S., Reniers, G., Yang, M., Bajpai, S., 2024. Risk assessment methods for process safety, process security, and resilience in the chemical process industry: A thorough literature review. *J. Loss Prev. Process Ind.* 88, 105274.
- Agency. I.A.E. Component Reliability Data for use in Probabilistic. Safety Assessment. IAEA., 1988.
- Alcantara, M. Santiago E., 2024. Étude de la sécurité thermique d'un réacteur chimique : approche par contrôle de la température (PhD Thesis). Université de Normandie.
- Andrews, J., Lunt, D.S., 2012. An Introduction to Fault Tree Analysis. *Qual. Reliab. Eng. Int.* 1–3.
- Andrews, J.D., 2000. To not or not to not, in: *Proceedings of the 18th International System Safety Conference*.
- Andrews, J.D., Beeson, S., 2003. Birnbaum's measure of component importance for non-coherent systems. *IEEE Trans. Reliab.* 52, 213–219.
- Andrews, J.D., Moss, T.R., 2002. Reliability and risk assessment. Professional Engineering Pub.
- Andriani, G., Pio, G., Salzano, E., Vianello, C., Mocellin, P., 2025. Evaluating the thermal stability of chemicals and systems: A review. *Can. J. Chem. Eng.* 103, 42–62. <https://doi.org/10.1002/cjce.25422>
- Arbre Analyst, 2023.
- Ashraf, A.M., Imran, W., Véhot, L., 2022. Analysis of the impact of a pandemic on the control of the process safety risk in major hazards industries using a Fault Tree Analysis approach. *J. Loss Prev. Process Ind.* 74, 104649. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2021.104649>

B

- Barlow, R.E., Chatterjee, P., 1973. Introduction to fault tree analysis.
- Barton, J.A., Nolan, P.F., 1989. Incidents in the chemical industry due to thermal runaway chemical reactions. *Hazards X Process Saf. Fine Spec. Chem. Plants* 115, 3–18.

- Beeson, S., Andrews, J., 2004. Calculating the Failure Intensity of a Non-coherent Fault Tree Using the BDD Technique. *Qual. Reliab. Eng. Int.* 20, 225–235. <https://doi.org/10.1002/qre.563>
- Beeson, S., Andrews, J.D., 2003. Importance measures for noncoherent-system analysis. *IEEE Trans. Reliab.* 52, 301–310.
- Beeson, S.C., 2002. Non-coherent fault tree analysis (PhD Thesis). Loughborough University.
- Benaissa, W., 2006. Développement d'une méthodologie pour la conduite en sécurité d'un réacteur continu intensifié. (PhD Thesis). Institut National Polytechnique (Toulouse).
- Berdouzi, F., 2017. Simulation dynamique de dérives de procédés chimiques : application à l'analyse quantitative des risques [Dynamic simulation of chemical process drift: Application to quantitative risk analysis] (PhD Thesis). University of Toulouse.
- Bicking, F., Simon, C., Mechri, W., 2013. Mesures d'importance par réseaux bayésiens, in: 10ème Congrès International Pluridisciplinaire Qualité et Sûreté de Fonctionnement, Qualita'2013. p. CDRom.
- Birnbaum, Z.W., 1968. On the importance of different components in a multicomponent system.
- Bobbio, A., Portinale, L., Minichino, M., Ciancamerla, E., 2001. Improving the analysis of dependable systems by mapping fault trees into Bayesian networks. *Reliab. Eng. Syst. Saf.* 71, 249–260.
- Boufenar, M., Merrouche, D., 2023. Enhanced approach for CDF quantification in Seismic Probabilistic Safety Assessment of a Research Reactor. *Algerian J. Eng. Technol.* 8, 245–257.
- Brasseul, J., 1998. Une revue des interprétations de la révolution industrielle. *Rev. Région Dév.* 7, 1–74.
- Broccanello, A., 2016. Prediction criteria of thermal runaway in the acid catalyzed esterification of acetic anhydride.

C

- Cavallotti, D., 2025. Modeling of a Distributed Electromechanical Flap Actuation System and Development of an Asymmetry Monitoring Logic (PhD Thesis). Politecnico di Torino.
- Chaux, P.-Y., 2013. Formalisation de la cohérence et calcul des séquences de coupe minimales pour les systèmes binaires dynamiques et réparables (PhD Thesis). École normale supérieure de Cachan-ENS Cachan.

- Chen, J., Zhang, L., Li, Y., Shi, Y., Gao, X., Hu, Y., 2022. A review of computing-based automated fault detection and diagnosis of heating, ventilation and air conditioning systems. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 161, 112395.
- Chettouh, S., 2021. Proposition d'une démarche de Retour d'Expérience pour l'évaluation et la prévention des accidents industriels. *Algerian J. Environ. Sci. Technol.* 7.
- Chettouh, S., Hamzi, R., 2014. Algerian oil refining industry: Analysis of past industrial accidents of the period 2002-2013. *World Appl Sci J* 29, 933–939.
- Chettouh, S., Hamzi, R., Benaroua, K., 2016. Examination of fire and related accidents in Skikda Oil Refinery for the period 2002–2013. *J. Loss Prev. Process Ind.* 41, 186–193.
- Contini, S., Cojazzi, G.G.M., Renda, G., 2008. On the use of non-coherent fault trees in safety and security studies. *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, 17th European Safety and Reliability Conference 93, 1886–1895. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2008.03.018>
- Coudert, O., Madre, J.C., 1992. A new method to compute prime and essential prime implicants of boolean functions, in: *Advanced Research in VLSI and Parallel Systems*. The MIT Press, p. 128.

D

- Dakkoune, A., 2019. Méthodes pour l'analyse et la prévention des risques d'emballement thermique (PhD Thesis). Normandie Université.
- Dakkoune, A., Vernières-Hassimi, L., Leveneur, S., Lefebvre, D., Estel, L., 2019. Analysis of thermal runaway events in French chemical industry. *J. Loss Prev. Process Ind.* 62, 103938. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2019.103938>
- Debray, B., Chaumette, S., Descouriere, S., Trommeter, V., 2006. OMEGA 7-Méthodes d'analyse des risques générés par une installation industrielle. *Inst. Natl. L'environnement Ind. Risques INERIS*.
- décret exécutif n°19-59 du 10 février 2019, n.d.
- Deloffre, C., 2001. Les évolutions de la directive Seveso.
- Demissy, M., Carson, D., Debray, B., 2005. Oméga17- La sécurité des procédés chimique (No. 56933).
- Duroeulx, M., 2020. Évaluation de la fiabilité des systèmes modélisés par arbres de défaillances grâce aux techniques de satisfiabilité. *Theses Univ. Lorraine*.

E

- Ebeling, C.E., 2019. An introduction to reliability and maintainability engineering. Waveland Press.
- Ehiagwina, F.O., Kehinde, O.O., Nafiu, A.S., Afolabi, L.O., Olatinwo, I., 2022. Fault Tree Analysis and Its Modifications as Tools for Reliability and Risk Analysis of Engineering Systems—An Overview. J. Homepage Www Ijrpr Com ISSN 2582, 7421.
- El Harabi, R., 2011. Supervision des processus chimiques à base de modèles Bond Graphs (PhD Thesis). Université des sciences et technologies de Lille 1; Ecole nationale d
- Ericson, I.I., 2014. Ca: Introduction to fault tree analysis. Saf. Solut. LLC 208, 4–13.

G

- Giovannini, B., Gaston, D., Gaston, D., 2000. Etude bibliographique relative au développement de réactions chimiques non contrôlées dans l'industrie.
- Guetarni, I.H.M., Aissani, N., Châtelet, E., Lounis, Z., 2019. Reliability analysis by mapping probabilistic importance factors into bayesian belief networks for making decision in water deluge system. Process Saf. Prog. 38, e12011. <https://doi.org/10.1002/prs.12011>
- Guglielmo, R., 1956. Principaux aspects du développement de la pétrochimie en France, in: Annales de Géographie. JSTOR, pp. 123–139.
- Gustin, J.L., 1991. Runaway reactions, their courses and the methods to establish safe process conditions. J. Phys. III 1, 1401–1419. <https://doi.org/10.1051/jp3:1991198>
- Gygax, R., 1988. Chemical reaction engineering for safety. Chem. Eng. Sci. 43, 1759–1771.

H

- Hernandez, E.A.G., 2020. Analyse de sensibilité globale appliquée à l'évaluation des risques thermiques (PhD Thesis). Normandie Université.
- Huang, Z., Li, M., Zhou, Z., Jiang, Y., 2025. Iterative Tree Analysis for Medical Critics. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2501.10642>
- Hurdle, E.E., 2008. System Fault Diagnosis Using Fault Tree Analysis (PhD Thesis). Loughborough University.

Hurdle, E.E., Bartlett, L.M., Andrews, J.D., 2007. System fault diagnostics using fault tree analysis. *Proc. Inst. Mech. Eng. Part O J. Risk Reliab.* 221, 43–55.
<https://doi.org/10.1243/1748006XJRR6>

I

Imakhlaf, A., 2021. Application des diagrammes de décision binaires pour l'analyse des arbres de défaillance cohérents et non-cohérents en présence d'incertitudes (PhD Thesis). Université de Technologie de Compiègne.

Isograph Reliability Workbench 14.0, 2014.

Jiang, Jiajia, Jiang, Juncheng, Wang, Z., Pan, Y., 2016. Thermal runaway criterion for chemical reaction systems: A modified divergence method. *J. Loss Prev. Process Ind.* 40, 199–206.

J

Journal officiel du 6 mars 2024, p5-14, n.d.

Journal officiel du 8 février 1983, N°6, Art 74- 88, P258, n.d.

Journal officiel du 10 février 2019, art n°19-59, p7 -11, n.d.

Journal officiel du 12 mars 1976, N°21, Art 1, p 238, n.d.

Journal officiel du 25 décembre 2004, Art 1-62, P14-20, n.d.

Journal officiel du 25 décembre 2004, N°84, Art 10, P15, 2004.

Journal officiel du 29 mai 1985, N° 36, p833, n.d.

K

Kabir, S., 2017. An overview of fault tree analysis and its application in model based dependability analysis. *Expert Syst. Appl.* 77, 114–135.

Kaufmann, A., Grouchko, D., Cruon, R., 1977. MATHEMATICAL MODELS FOR THE STUDY OF THE RELIABILITY OF SYSTEMS.

Khan, F., Rathnayaka, S., Ahmed, S., 2015. Methods and models in process safety and risk management: Past, present and future. *Process Saf. Environ. Prot.* 98, 116–147.

Khan, F.I., Abbasi, S.A., 1999. Major accidents in process industries and an analysis of causes and consequences. *J. Loss Prev. Process Ind.* 12, 361–378.

- Kharouati Aicha, 2021. Contribution à l'étude de la sûreté de fonctionnement des systèmes instrumentés intelligents (PhD Thesis). UNIVERSITE BADJI MOKHTAR–ANNABA.
- Khungla, H., Singh, K., Kumar, M., 2024. Interval-Valued Fuzzy Fault Tree Analysis through Qualitative Data Processing and its Applications in Marine Operations. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2411.15249>
- Konstandinidou, M., Nivolianitou, Z., Markatos, N., Kiranoudis, C., 2006. Statistical analysis of incidents reported in the Greek petrochemical industry for the period 1997–2003. *J. Hazard. Mater.* 135, 1–9.
- Kostolny, J., Kvassay, M., Kovalik, S., 2014. Reliability analysis of noncoherent systems by logical differential calculus and binary decision diagrams. *Commun.-Sci. Lett. Univ. Zilina* 16, 114–120.
- Kummer, A., Varga, T., 2021. What do we know already about reactor runaway? – A review. *Process Saf. Environ. Prot.* 147, 460–476. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.09.059>
- Kummer, A., Varga, T., Nagy, L., 2020. Semi-batch reactor control with NMPC avoiding thermal runaway. *Comput. Chem. Eng.* 134, 106694. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2019.106694>
- Kvassay, M., Zaitseva, E., Kostolny, J., Levashenko, V., 2017. Reliability analysis of noncoherent systems based on logical differential calculus. *ESREL* 2016.

L

- Lambert, H.E., 1975. *FAULT TREES FOR DECISION-MAKING IN SYSTEMS ANALYSIS*. University of California, Berkeley.
- Lapp, S.A., Powers, G.J., 1977. Computer-aided synthesis of fault-trees. *IEEE Trans. Reliab.* 26, 2–13.
- Larsen, M., Tilsted, J.P., 2024. The future of fossil fuels, chemicals, and feedstocks: Outlining a research agenda on the role of China in the global petrochemical industry. *Energy Res. Soc. Sci.* 118, 103750.
- Laurent, A., 2011. *Sécurité des procédés chimiques : Connaissances et méthodes d'analyse des risques*. Tec & doc.
- Limnios, N., 2013. *Fault trees*. John Wiley & Sons.
- Liu, L., Ni, L., Jiang, J., Mebarki, A., Zhang, W., 2018. Consequence analysis of derivative accidents due to reaction runaway. *J. Loss Prev. Process Ind.* 55, 471–479.

Lübbe, S., Bertram, O., 2024. Safety Critical Design of Flight Control System Architectures- Potential Safety Aspects for a Triple Split Aileron for the Project WISDOM. Deutsche Gesellschaft für Luft-und Raumfahrt-Lilienthal-Oberth eV.

M

Manuel d'utilisation du méthanol, rapport interne de la société CP1Z, ORAN, ALGÉRIE., 2014.

Margossian, N., 2006. Risques et accidents industriels majeurs: Caractéristiques, réglementation, prévention. Dunod.

Merle, G., Roussel, J.-M., 2007. Modélisation algébrique des arbres de défaillance temporels.

Mihailidou, E.K., Antoniadis, K.D., Assael, M.J., 2012. The 319 major industrial accidents since 1917. Int. Rev. Chem. Eng. 4, 529–540.

Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie, Commission européenne, Code de l'environnement, n.d. Code de l'environnement.

MINISTÈRE DES HYDROCARBURES ET DES MINES, 2024. la carte de gisement de pétrole (vert) et gaz (rouge) et réseaux de transport reliant ces gisements aux terminaux au nord d'Algérie.

MINISTÈRE DES HYDROCARBURES ET DES MINES, 2024. la carte des principales raffineries et zones des entrepôts d'Algérie.

Modarres, M., 2006. Risk Analysis in Engineering: Techniques, Tools, and Trends. Taylor & Francis group.

Mohamed-Chérif, F.Z., Chacha, D., 2015. Cartographie des risques industriels du dépôt pétrolier à Hussein Dey, Alger (Algérie). Cinq Cont. 5.

Mortureux, Y., 2002. Arbres de défaillance, des causes et d'événement.

Musset, R., 1962. Les progrès de la pétrochimie en France., in: Annales de Géographie. Société de géographie, pp. 441–444.

N

Nehal, N., Lounis, Zakia, Bouhadiba, B., Lounis, Zoubida, 2023. Modelling of heating furnace fire scenarios using fault tree analysis, a bayesian network, and a thermal transfer method for system reliability analysis. J. Loss Prev. Process Ind. 83, 104995.

Niel, E., Craye, E., 2002. maîtrise des risques et sûreté de fonctionnement des systèmes de production.

Nolan, P.F., Barton, J.A., 1987. Some lessons from thermal-runaway incidents. *J. Hazard. Mater.* 14, 233–239. [https://doi.org/10.1016/0304-3894\(87\)87015-2](https://doi.org/10.1016/0304-3894(87)87015-2)

O

Oreda, Offshore Reliability Data Handbook. OREDA, 2002.

P

Peer-Review-report-Algeria, 2019, n.d.

Purba, J.H., Tjahyani, D.S., Widodo, S., Ekariansyah, A.S., 2020. Fuzzy probability based event tree analysis for calculating core damage frequency in nuclear power plant probabilistic safety assessment. *Prog. Nucl. Energy* 125, 103376.

R

Rasouli, S., Eshkofti, K., Hosseini, S.M., Pishbin, E., 2021. Human Reliability Analysis for Cardiopulmonary Resuscitation Process in Emergency Medicine Using a Modified Hybrid Method Based on the Markov Model and Fault Tree Analysis. *J. Patient Saf. Qual. Improv.* 9, 163–175.

Rauzy, A., 1993. New algorithms for fault trees analysis. *Reliab. Eng. Syst. Saf.* 40, 203–211.

Remenyte-Prescott, R., Andrews, J., 2008. Analysis of non-coherent fault trees using ternary decision diagrams. *Proc. Inst. Mech. Eng. Part O J. Risk Reliab.* 222, 127–138. <https://doi.org/10.1243/1748006XJRR154>

Ruijters, E., Stoelinga, M., 2015. Fault tree analysis: A survey of the state-of-the-art in modeling, analysis and tools. *Comput. Sci. Rev.* 15, 29–62.

S

Sahin, B., Yazidi, A., Roman, D., Soylu, A., 2021. Ontology-based fault tree analysis algorithms in a fuzzy environment for autonomous ships. *IEEE Access* 9, 40915–40932.

- Santiago, I.B., 2007. Elaboration de propriétés formelles de contrôleurs logiques à partir d'analyse prévisionnelle par Arbre des Défaillances (PhD Thesis). École normale supérieure de Cachan-ENS Cachan.
- Sarbayev, M., Yang, M., Wang, H., 2019. Risk assessment of process systems by mapping fault tree into artificial neural network. *J. Loss Prev. Process Ind.* 60, 203–212.
- Semenov, N., 1928. *Thermal Theory of Combustion and Explosion: Theory of Normal Flame Propagation-3*.
- Sharma, P., Singh, A., 2015. Overview of fault tree analysis. *Int J Eng Res Technol* 4, 337–340.
- Sharvia, S., Papadopoulos, Y., 2008. Non-coherent modelling in compositional fault tree analysis. *IFAC Proc. Vol.* 41, 4138–4143.
- Shen, Y., 2020. *Thermal Stability Studies of Benzoyl Peroxide Systems*. Tex. AM Univ.
- Shi, T., Gao, Y., Xu, L., Wang, Y., 2025. Research on Aircraft Control System Fault Risk Assessment Based on Composite Framework. *Aerospace* 12, 532.
- Sinnamon, R.M., 1996. Binary decision diagrams for fault tree analysis (PhD Thesis). \copyright Roslyn Mary Sinnamon.
- Stamatelatos, M., Vesely, W., Dugan, J., Fragola, J., Minarick, J., Railsback, J., 2002. *Fault tree handbook with aerospace applications*.
- Stoessel, F., 2021. *Thermal safety of chemical processes: risk assessment and process design*. John Wiley & Sons.
- Stoessel, F., 1993. What is your thermal risk? *Chem. Eng. Prog.* 89, 68–75.

T

- Talebberrouane, M., Khan, F., Lounis, Z., 2016. Availability analysis of safety critical systems using advanced fault tree and stochastic Petri net formalisms. *J. Loss Prev. Process Ind.* 44, 193–203.
- Tao, Y., 2010. *Risk-informed maintenance for non-coherent systems* (PhD Thesis).
- Tennci, L., Souiah, M., 2019. Ali, sentinelle du risque pétrochimique Les cancers d'origine professionnelle, une étude de cas⁴³.
- Trivedi, K.S., Bobbio, A., 2017. *Reliability and availability engineering: modeling, analysis, and applications*. Cambridge University Press.

U

- Ünal, A.U., Arıcan, O.H., 2025. Accident Risk Analysis of Gas Tankers in Maritime Transport Using an Integrated Fuzzy Approach. *Appl. Sci.* 15, 6008.
- U.S.Energy Information Administration.Algeria, 2013. U.S.Energy Information Administration.Algeria. Algérie.

V

- Verley, P., 1985. La révolution industrielle. MA Editions Paris.
- Vesely, W.E., Goldberg, F.F., Roberts, N.H., Haasl, D.F., 1981. Fault tree handbook.
- Villemeur, A., 1988. Sureté de fonctionnement des systèmes industriels: fiabilité-facteurs humains, informatisation.
- Villemur, C., Petit, L., Bianchini, N., Rotureau, P., 2019. Runaway reaction hazard assessment for chemical processes safety. *Chemical Engineering Transaction*, pp. 451–456.
- Vince, A.S., 2000. Etat de l'Art des Méthodes Expérimentales d'Analyse de Risque de l'Emballlement Thermique.

W

- Wen, X., Bai, W., Lv, X., Wang, J., Kummer, A., Lv, J., 2025. Thermal behavior decision tree of safe operation for single diffusion-controlled liquid–liquid heterogeneous reactions in semi-batch reactors. *Chem. Eng. J.* 163978.
- Wilday, J., Etchells, J., 1998. Workbook for Chemical Reactor Relief System Sizing. HSE Contract Research Report 136.

X

- Xiao, X., Liang, J., Tong, J., Wang, H., 2024. Emergency decision support techniques for nuclear power plants: Current state, challenges, and future trends. *Energies* 17, 2439.

Y

- Yang, Y.-N., Jin, J., Zhu, L.-T., Zhou, Y.-N., Luo, Z.-H., 2024. Runaway criteria for predicting the thermal behavior of chemical reactors. *Curr. Opin. Chem. Eng.* 43, 100986. <https://doi.org/10.1016/j.coche.2023.100986>
- Yu, A., Zhou, J., Hua, M., Pan, X., Jiang, J., Wang, S., 2023. Predicting thermal runaway in styrene polymerization reactions: divergence criterion with phase space reconstruction. *Process Saf. Environ. Prot.* 172, 802–814.

Z

- Zhang, H., Bai, M., Wang, X., Gai, J., Shu, C.-M., Roy, N., Liu, Y., 2021. Thermal runaway incidents-a serious cause of concern: An analysis of runaway incidents in China. *Process Saf. Environ. Prot.* 155, 277–286.
- Zhang, J., Tighe, C.J., Hellgardt, K., Unruh, D., Bos, R., 2024. Generalized runaway diagrams for catalytic reactors with stacked catalyst activities. *Chem. Eng. J.* 502, 157960.
- Zhang, Q., Mei, Q., 1987. Reliability analysis for a real non-coherent system. *IEEE Trans. Reliab.* 36, 436–439.
- Ziani, R., 2007. A fast algorithm for non-coherent fault tree analysis. *Courr. Savoir* 111–116.