الجمهـــوريـــــة الجزائـــريـــــة الديمقـــراطيـــة الشـعبيـــة
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التـــعـلـــيـــم العـــــالـــــي والبـــحـــــث العـلمـــي
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique
جامعة وهران 2 محمد بن أ حمد
Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed

معهد الصيانة والأمن الصناعي
Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle

Département : Sécurité industrielle et Environnement

MÉMOIRE Master

Filière : Hygiène et Sécurité Industrielle

Spécialité : Sécurité industrielle et Environnement

Application de la méthode H-HAZOP associés aux réseaux bayésiens pour l'identification et analyse des erreurs humaines dans une unité de procédés à risques

Présenté et soutenu publiquement par :

Bounaga Abdelali

Devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
GUETARNI ISLAM	MCB	IMSI-Univ. D'Oran2	Examinateur
LOUNIS Zoubida	Professeur	IMSI-Univ. D'Oran2	Encadreur
BENOMAR FATIMA	MAB	IMSI-Univ. D'Oran2	Président

Année :

2026

Remerciements

Je tiens tout d’abord à remercier Dieu le Tout-Puissant et Miséricordieux, qui m’a donné la force et la volonté nécessaires pour accomplir ce modeste travail.

La réalisation de ce mémoire n’est pas seulement le fruit d’un effort personnel, mais celui du soutien et des encouragements de plusieurs personnes qui m'ont accompagné tout au long de ce parcours.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude et mes sincères remerciements à mon encadrante, **Mme Lounis**, pour sa patience, ses précieux conseils et le temps qu’elle a consacré à m’orienter. Son expertise a été déterminante pour mener à bien ce projet. Que ce travail soit un témoignage de mon profond respect.

Je remercie infiniment mes chers parents, qui ont toujours été ma source d'inspiration. Vous avez tout sacrifié pour mon éducation, n’épargnant ni santé ni efforts pour m'offrir un modèle de persévérance. Je vous serai éternellement redevable.

Un merci tout particulier à **ma sœur** pour son soutien indéfectible et ses encouragements constants. Une pensée affectueuse à **mon neveu**, dont la présence et la joie de vivre m'ont donné la motivation nécessaire pour avancer durant les moments de fatigue.

Je remercie également les membres du jury pour l’honneur qu’ils me font en acceptant d’examiner et d’évaluer ce modeste travail.

Enfin, que tous les enseignants qui ont contribué à ma formation trouvent ici l’expression de ma vive reconnaissance.

Résumé

Ce travail concerne l'amélioration de l'analyse des risques industriels par la prise en considération de la variable humaine. Les méthodes traditionnelles comme le HAZOP ne peuvent pas prendre correctement en considération la variable humaine. Il est donc proposé une méthode qui utilise la technique H-HAZOP et les réseaux bayésiens.

Il s'agit de transposer la phase qualitative de la méthode H-HAZOP vers une analyse probabiliste des risques, et de l'utiliser pour analyser l'interdépendance entre ces risques. Ce modèle est mis en application dans l'unité GPL de la raffinerie de Skikda avec une attention particulière portée au risque de surpression et d'explosion de l'accumulateur.

Il ressort de l'étude que l'erreur humaine, notamment en cas de dysfonctionnement des systèmes de protection, est une cause importante dans l'augmentation du risque. La technique bayésienne aide grandement dans l'analyse notamment au niveau de la simulation des scénarios.

Abstract

This thesis is concerned with the improvement of risk analysis in industry by incorporating the human factor. Traditional approaches like HAZOP have proven to be inadequate in incorporating human errors into the analysis. As such, a method that combines Human HAZOP (H-HAZOP) with Bayesian networks is suggested.

The methodology involves using results generated from qualitative analysis by H-HAZOP to develop a probabilistic model capable of analyzing risks and their interactions. The methodology is tested on a Propane Liquefied Petroleum Gas (GPL) unit in the Skikda refinery plant where attention is drawn specifically to the risk of over-pressure and explosion in an accumulator.

It is observed that human errors are significant contributors to increased risks especially in the event of failure of safety systems. The use of Bayesian networks has been effective in improving risk analysis through better simulation and identification of critical factors.

ملخص

تتمحور هذه الدراسة حول تطوير تحليل المخاطر الصناعية من خلال دمج "العامل البشري" كعنصر محوري؛ حيث إن المنهجيات التقليدية، وعلى رأسها طريقة HAZOP، تفتقر إلى القدرة الكافية على استيعاب هذا المتغير المعقد. وبناءً على ذلك، تم اقتراح مقاربة منهجية تعتمد على التآزر بين طريقة H-HAZOP والشبكات البايزية (Bayesian Networks).

تعتمد المنهجية المقترحة على صياغة النتائج النوعية المستخلصة من H-HAZOP وتحويلها إلى نموذج احتمالي كمي يتيح تحليل المخاطر وتفاعلاتها البينية بدقة عالية. وقد جرى إسقاط هذا النموذج عملياً على وحدة الغاز البترولي المسال (GPL) بمصفاة سكيكدة، مع التركيز على سيناريوهات الضغط الزائد وانفجار الخزانات.

خلصت الدراسة إلى أن الأخطاء البشرية، لا سيما عند اقترانها بفشل أنظمة الحماية الآلية، ترفع من مؤشر الخطر بشكل حاد. كما أثبتت النتائج أن الاعتماد على الشبكات البايزية يوفر مرونة فائقة في محاكاة السيناريوهات وتحديد المتغيرات الأكثر تأثيراً، مما يساهم في دعم اتخاذ القرار الأمني داخل المنشأة.

Table des Matières

Remerciements

Résumé

Table des Matières

Liste des tableaux

Listes des figures

Liste des Abréviations

Introduction générale 2

Chapitre 1 Facteur humain et sécurité industrielle 6

1. Introduction. 6
2. Définition et évolution du concept de facteur humain 6
   I. Émergence historique de la technique à l'humain 6
   II. Définitions contemporaines du facteur humain 7
3. Modèles théoriques de la genèse des accidents 9
   I. Le modèle de Heinrich revisité : de la causalité linéaire à la critique systémique. 9
   II. Le modèle de Reason (1990) : approche systémique des défaillances humaines... 9
   III. Le modèle SRK de Rasmussen (1983) : analyse cognitive des comportements… 10
   IV. La théorie du comportement planifié (TPB) : approche psychosociale des comportements de sécurité 11
   V. Implications pour l'analyse des risques 11
4. Typologie des erreurs humaines et comportements 11
   I. Erreurs vs Violations 12

II. Expérience des opérateurs et taux d'accidents 12
III. Cécité attentionnelle et autres limitations cognitives 13
IV. Facteurs techniques 13
V. Comportement à risque et analyse statistique 13
VI. Implications pour la prévention des accidents 14
5. Facteurs cognitifs et individuels 14
I. Stress professionnel 14
II. Rôle de médiateur du stress au travail dans les accidents. 15
III. Sens des comportements de contrôle et de sécurité. 15
IV. Santé générale fatigue. 16
6. Facteurs organisationnels et psychosociaux 16
I. Le climat de sécurité (Safety Climate) 16
II. Le modèle effort récompense et la motivation au travail. 17
III. Conflit travail famille et impact sur la sécurité 17
IV. Formation, compétence et supervision. 17
V. Culture organisationnelle et comportements de sécurité 18
VI. Interaction entre facteurs organisationnels et humains 18
VII. Implications pour la méthode H-HAZOP 18
7. Analyse des accidents industriels 19
I. Facteurs environnementaux et conditions de travail 19
II. Analyse par agents matériels et nature des accidents 19
III. Analyse démographique des accidents 19
IV. Analyse systémique des accidents 20
V. Études de cas et validation empirique 20
VI. Implications pour la prévention et l'analyse des risques 20

8. Conclusion du chapitre 1 21

Chapitre 2 La méthode Human Hazop (H-HAZOP) 23

1. Introduction 23
2. Origine et fondements de la méthode HAZOP 23
   I. Contexte historique et développement de la méthode HAZOP 23
   II. L'accident de Flixborough (1974) : un tournant majeur 24
   III. Concepts fondamentaux du HAZOP 24
   IV. Le rôle de l'équipe multidisciplinaire 24
   V. Normalisation et cadre industriel 25
   VI. Limites du HAZOP classique 25
3. Extension au facteur humain (H-HAZOP) 25
   I. Limites du HAZOP technique 25
   II. Émergence du Human HAZOP 26
   III. Le concept de « nœud social » 27
   IV. Fiabilité humaine et processus cognitifs 27
   V. Apports du H-HAZOP dans la gestion des risques 28
4. L'analyse des tâches : le pivot de la méthode 28
   I. L'Analyse Hiérarchique des Tâches (HTA) 28
   II. Analyse des fonctions cognitives (modèle CREAM) 29
   III. Conditions de performance (CPC – Common Performance Conditions) 29
   IV. Intégration HTA–CREAM dans le H-HAZOP 30
   V. Apports de l'analyse des tâches dans le H-HAZOP 30
5. Les mots-guides humains 30
   I. Réinterprétation des mots-guides classiques 30
   II. Mots-guides temporels et séquentiels 31

III. Mots-guides qualitatifs et cognitifs 31
IV. Intégration dans la démarche H-HAZOP 31
6. Procédure détaillée du H-HAZOP 31
I. Préparation de l'étude et composition de l'équipe 31
II. Déroulement des sessions d'analyse 31
III. Identification des causes des déviations 32
IV. Élaboration des recommandations 32
V. Documentation et suivi 32
7. Limites et défis de la méthode H-HAZOP 32
I. Nature heuristique de la méthode 32
II. Dépendance à l'expertise et aux ressources 33
III. Difficulté de modélisation des comportements humains 33
IV. Risque de normalisation des déviations 33
V. Limites qualitatives et besoin de quantification 34
8. Conclusion du chapitre 2 35
Chapitre 3 Modélisation probabiliste des risques par Réseau Bayésien 37
1. Introduction 37
2. Fondements de la théorie des probabilités 38
I. Importance des probabilités dans le H-HAZOP 38
3. Structure et formalisme des réseaux bayésiens 38
I. Définition et composants d'un réseau bayésien 38
II. Indépendance conditionnelle 39
III. Tables de probabilités conditionnelles (CPT) 39
IV. Interprétation causale des réseaux bayésiens 40
4. Construction et apprentissage du réseau 40

I. Apprentissage de la structure 40
II. Apprentissage des paramètres 41
III. Intégration de la logique floue 42
IV. Difficultés et enjeux de la construction 42
V. Apports pour le H-HAZOP 42
5. Inférence probabiliste et raisonnement 42
I. Inférence directe (Forward Propagation) 43
II. Inférence inverse (Backward Propagation / Diagnostic) 43
III. Inférence mixte et propagation des croyances 44
IV. Algorithmes d'inférence 44
V. Intérêt de l'inférence pour la sécurité industrielle 44
VI. Intégration avec le H-HAZOP 45
6. Analyse de la dynamique et de la résilience 45
I. Réseaux bayésiens dynamiques (DBN) 45
II. Résilience et capacité d'adaptation 46
III. Mesures d'importance et criticité 46
7. Applications en sécurité industrielle et HSE 46
I. Conversion des arbres de défaillance en réseaux bayésiens 46
II. Évaluation des barrières de sécurité 47
III. Réseaux bayésiens / Facteur humain / Lien avec H-HAZOP. 47
IV. Analyse de l'effet domino 47
8. Conclusion du chapitre 3 48
Chapitre 4 Intégration de la méthode H-HAZOP avec les Réseaux Bayésiens 50
1. Introduction 50
2. Transformation des scénarios HAZOP en variables 51

I. Règles de correspondance (Mapping HAZOP → Réseau Bayésien) 52
II. Définition des états des nœuds 53
III. Structuration hiérarchique du modèle 54
IV. Avantages de la transformation 54
3. Construction du réseau 55
I. Approche par sous-réseaux 55
II. Prise en compte des facteurs humains dans le réseau 55
III. Outils de modélisation 56
4. Définition des probabilités 56
I. Collecte des données et expertise 56
II. Intégration de la logique floue 57
III. Validation des probabilités 58
IV. Apports de l'approche FDBN 58
5. Conclusion du chapitre 4 59
Chapitre 5 Application industrielle (Unité GPL – Raffinerie de Skikda) 61
1. Introduction 61
2. Description détaillée du système (Unité 30) 62
I. Contexte de l'Unité GPL 62
II. Processus technique et équipements clés 62
III. Délimitation du nœud d'étude 63
3. Analyse H-HAZOP (Facteur Humain) 63
I. Décomposition des tâches critiques de l'opérateur 64
II. Application de la méthodologie H-HAZOP 65
4. Construction du Réseau Bayésien (RB) 68
I. Identification des variables (nœuds du réseau) 68

II. Structure du réseau 69
III. Attribution des probabilités 70
5. Simulation et Résultats 74
I. Inférence bayésienne 74
II. Simulation des conséquences (approche ALOHA) 78
6. Interprétation et Recommandations 80
I. Analyse de la criticité du facteur humain 80
II. Stratégies de réduction des risques (Approche ALARP) 81
7. Conclusion du chapitre 5 83
Conclusion Générale 85
Bibliographie 87

Liste des tableaux

Tableau 1: activités manuelles critiques 64
Tableau 2: facteurs de performance 65
Tableau 3: Matrice H-HAZOP pour l'unité GPL 65
Tableau 4: la feuille H-HAZOP (Unité GPL) 66
Tableau 5: probabilité des facteurs humains (nœuds parents) 70
Tableau 6: Probabilité d'erreur opérateur 71
Tableau 7: Probabilité de surpression 72
Tableau 8: probabilité d'explosion 73
Tableau 9: Analyse de sensibilité des probabilités d'explosion 76

Listes des figures

Figure 1: Schéma conceptuel de transformation HAZOP → Réseau Bayésien 53
Figure 2: Structure du réseau bayésien.....70
Figure 3:Zone de menace due à l'explosion dans l'accumulateur V-1 79
Figure 4: Image de la zone de menace due à l'explosion dans l'accumulateur V-1……...80

Liste des Abréviations

AHP : Analytic Hierarchy Process (Processus d'Analyse Hiérarchique)

ALARP : As Low As Reasonably Practicable (Aussi bas que raisonnablement possible)

CCPS : Center for Chemical Process Safety

CPC : Common Performance Conditions (Conditions de performance)

CPT : Conditional Probability Table (Table de probabilités conditionnelles)

CREAM : Cognitive Reliability and Error Analysis Method

DAG : Directed Acyclic Graph (Graphe orienté acyclique)

EM : Expectation-Maximization (Espérance-Maximisation)

EPI : Équipement de Protection Individuelle

FTA : Fault Tree Analysis (Analyse par Arbre de Défaillances)

GES : Greedy Equivalence Search

GPL : Gaz de Pétrole Liquéfié

HAZOP : Hazard and Operability Study

H-HAZOP : Human Hazard and Operability Study

HSE : Hygiene, Safety, and Environment (Hygiène, Sécurité et Environnement)

HTA : Hierarchical Task Analysis (Analyse Hiérarchique des Tâches)

MCMC : Markov Chain Monte Carlo (Méthodes de Monte Carlo et chaînes de Markov)

MLE : Maximum Likelihood Estimation (Estimation du Maximum de Vraisemblance)

MOC : Management of Change (Gestion du Changement)

PBC : Perceived Behavior Control (Contrôle du comportement perçu)

RB / RBD : Réseaux Bayésiens / Réseaux Bayésiens Dynamiques

REX : Retour d'Expérience

RRW : Risk Reduction Worth (Valeur de la réduction des risques)

SAM : Similarity Aggregation Method

SN : Subjective Norms (Normes subjectives)

SRK : Skill, Rule, Knowledge (Compétences, Règles, Connaissances)

TPB : Theory of Planned Behavior (Théorie du comportement

Introduction

Introduction générale

Les industries de haut risque, avec usage de pétrochimie, exploitation pétrolière et gazière, est lié à : Contrôle de produits chimiques, flammes, toxiques ou explosifs, etc. Sous condition de température élevée et presse élevée. Les établissements en question restent donc toujours exposés à des accidents majeurs dont les causes sont humaines, avec parfois un impact significatif sur l'environnement ou sur la rentabilité économique.

C'est le fait d'une analyse historique des accidents industriels : les accidents se déroulent presque toujours avec un seul facteur de cause. En règle générale ce sont des questions qui implique une panoplie de causes techniques, d'organisation humaines ou autres. En première ligne parmi les facteurs qui pèsent sur l'importance de l'accident dans son étiologie l'être humain. Toutes les mauvaises interprétations, la mauvaise prise de décisions ou les déficiences de l'homme au traitement des tâches contribuent profondément à la nature désorganisée des systèmes industriels.

Actuellement beaucoup de systèmes pour analyser le risque comme, par exemple, HAZOP (Hazard and Operability) se concentrent sur les déviations des paramètres de procédé, et les déficiences techniques. Ces approches se sont révélées efficaces pour identifier les dangers techniques et utiles dans la mesure où elles permettent d'évaluer les risques sur les systèmes industriels. En revanche, ces méthodes ne sont relativement pas très bonnes pour ce qui est d'intégration des aspects humains et organisationnels. Il se trouve qu'on ne saurait réduire le comportement humain à un élément technique qui dépendrait pour l'essentiel d'un nombre de choses : la fatigue, le niveau cognitif, etc.

On peut donc affirmer avec raison que l'approche H-HAZOP (Human Hazard and Operability) est une suite logique aux études HAZOP classiques. Elle procure aussi un moyen d'effectuer une analyse élaborée des activités des personnes à partir de la reconnaissance des écarts possibles au cours des traitements de tâches. En utilisant ces mots-clés spécifiquement conçus pour décrire les actions humaines, on peut obtenir une vision plus objective des fautes potentielles et de leurs impacts sur l'ensemble du système.

Cependant, la méthode H-HAZOP reste une approche qualitative où l'application s'accompagne d'une identification de scénarios de risques non associés par une estimation probabiliste de leur occurrence. Néanmoins dans l'environnement industriel que nous connaissons ce qui a été décrit ici jusqu'à présent nécessite de disposer d'une vision quantitative des risques. Il s'agit de faire des bons choix.

C'est pour cette raison que les réseaux bayésiens deviennent intéressants pour l'étude des risques industriels. C'est en raison de leur approche probabiliste que ces derniers se révèlent efficaces pour l'analyse de l'environnement industriel. Les réseaux bayésiens sont capables d'intégrer des informations quantitatives et qualitatives et réaliser des analyses prédictive et diagnostique.

Ainsi, l'approche hybride basée sur l'application du H-HAZOP et les réseaux bayésiens est innovante et intéressante. Cette approche permet d'intégrer les mérites d'une analyse qualitative avec l'objectivité de la modélisation probabiliste des risques. Son objectif est de comprendre plus parfaitement l'influence du facteur humain sur la dynamique des systèmes industriels et sur leur sécurité

Afin de réaliser une amélioration des approches d'analyse de risques basées sur le facteur humain dans un modèle probabiliste, il est prévu d'étudier le système industriel réel unité GPL de la raffinerie de Skikda.

Le but général de ce mémoire est la conception d'une méthodologie unifiée pour l'étude des risques dans l'industrie industrielle reliant le H-HAZOP avec les networks Bayésiens.

De manière plus spécifique, ce travail vise à :

- Analyser, dans l'étude de la prise en compte humaine du facteur risque, les limites des méthodes classiques d'évaluations de risques.
- Expliquer les bases théoriques de H-HAZOP et des réseaux bayésiens.
- Développement d'une approche méthodologique pour convertir les résultats d'une analyse H-HAZOP en un modèle probabiliste.

- L’utilisation de cette approche dans le contexte d'un véritable système industriel pour établir des scénarios critiques ;
- Évaluer quantitativement l'effet des erreurs humaines dans la probabilité de survenue d'un grave accident ;
- Fournir des recommandations pour l’amélioration de la sécurité des procédés

CHAPITRE I

Chapitre 1 Facteur humain et sécurité industrielle

1. Introduction.

Les efforts de prévention des risques en milieu industriel étaient axés sur la recherche et la prévention de l'échec matériel. Cependant, une étude poussée d'un grand nombre d'accidents graves survenus au sein des sociétés industrielles, l'équipe a considéré qu'il est très probable que les facteurs humains sont des éléments importants dans la création d'accident (ISG Revue, 2020).

De plus l'interaction entre l'homme, la tâche effectuée par cet homme et l'entourage de cette tâche a une importance majeure dans la constitution des situations dangereuses dans les systèmes industriels. Les conditions de travail, les contraintes organisationnelles, les facteurs cognitifs ainsi que les facteurs psycho comportementaux, interagissent pour créer l'activité de chaque opérateur.

2. Définition et évolution du concept de facteur humain

I. Émergence historique de la technique à l'humain

La sécurité des usines est cruciale et la conscience du rôle de l'homme à l'intérieur de celle-ci a beaucoup évolué. Dans l'approche la plus ancienne, on cherchait à limiter au maximum les défaillances des systèmes matériels eux-mêmes. De cette première logique sont issues des analyses poussées, des avancées dans la fiabilité des équipements et des progrès réglementaires. Ces approches restent tout à fait légitimes et nécessaires mais il est rapidement devenu évident qu'elles ne suffisaient pas. En effet, trop d'accidents graves se produisaient malgré des installations techniquement efficaces et en règle au regard de la sécurité. C'est ce constat qui a conduit à l'affirmation d'une nécessité de prise en compte du « facteur humain » dans la sécurité des systèmes industriels (Revue ISG, 2020).

Un des premiers modèles à avoir mis en lumière le rôle du facteur humain est celui proposé par Heinrich en 1931, il est aujourd'hui connu sous le nom de « théorie des dominos ». Selon cette approche l'accident est consécutif d'une chaîne causale comprenant cinq éléments successifs : l'environnement social, la faute de la personne, l'acte dangereux,

l'accident et la blessure. Heinrich a considéré que 88 % des accidents étaient imputables à des actes dangereux, 10 % à des conditions dangereuses et seulement 2 % à des causes imprévisibles (Heinrich, 1931).

Pourtant, le modèle de Heinrich comporte d'importantes lacunes. Il attribue sans relâche les accidents uniquement aux personnes, en excluant les facteurs systémiques et contextuels.

Dans cette optique, les modèles contemporains de sécurité ont vu la naissance d'une approche systémique, dans laquelle les accidents sont perçus comme le produit d'interactions complexes conjointe de plusieurs niveaux du système. Ce développement représente le socle des nouvelles techniques d'analyse de risque comme la méthode H-HAZOP qui se fixent comme but principal l'identification et l'analyse des écarts de performance dus aux facteurs humains dans un cadre systémique.

II. Définitions contemporaines du facteur humain

Sur le plan physique, l'homme est constitué de différentes parties du corps qui fonctionnent de manière interactive pour lui permettre d'assumer des tâches dans un environnement donné. En faisant référence aux principes de conception, l'ingénierie ergonomique prend en compte les limites des capacités physiques et cognitives de l'homme pour concevoir des systèmes qui amplifient les performances humaines et facilitent le flux interactif des activités de l'homme et du système productif. Les limitations physiques humaines peuvent être appliquées aux éléments de la description de la tâche afin de garantir que les tâches puissent être réalisées. Les autres limitations, issues de capacités cognitives, sensorielles et motrices, peuvent également être prises en compte. Les dimensions, les capacités et les forces du corps humain font également partie des considérations ergonomiques. Les caractéristiques du système humain qui influencent la performance humaine comprennent la taille, la forme, le poids, la portée, la préhension, la posture, la force, l'endurance, la flexibilité, la sensibilité, l'acuité motrice et visuelle, la dextérité, la santé, le niveau de fatigue, la faculté d'apprentissage, l'âge et la condition physique.

Sur le plan cognitif, Les processus mentaux liés à la perception, au traitement de l'information et à la prise de décision constituent des fonctions mentales supérieures. Ces processus offrent à l'individu la possibilité de traiter des informations. Ces fonctions

supérieures sont cruciales pour développer l'attention, l'apprentissage et la prise de décision. Les processus que personnes utilisent incluent l'attention, la mémoire, la compréhension des situations, et la capacité à anticiper des événements, mais aussi la planification qui est la capacité d'anticiper des événements futurs. Les limitations cognitives peuvent être une source importante d'erreurs dans les systèmes complexes dans lesquels les opérateurs doivent traiter beaucoup d'informations en ligne. La charge d'information indique la quantité d'information que l'utilisateur doit gérer, habituellement appelée intoxication. La surcharge cognitive fait référence à la situation où la mémoire de travail se retrouve pleine à ras bord, ce qui provoque un « blocage » en raison de la surabondance d'informations. Cela peut également entraîner une baisse de la vigilance. Cela augmente également le risque de mal interpréter des signaux (Kahneman, 2011).

Sur le plan psychosocial, le facteur humain englobe la motivation, le stress, les relations sociales et la culture organisationnelle. Le comportement et l'engagement individuel en matière de sécurité sont directement impactés. Des études montrent que divers facteurs, tels que le stress au travail, les conflits travail-famille et le déséquilibre entre effort et récompense, influencent significativement la propension aux accidents en agissant sur la cognition et le comportement des travailleurs (Barkhordari et al., 2019).

Dans cette perspective, le facteur humain ne doit plus être vu uniquement comme une source d'erreur, mais aussi comme un facteur clé de résilience des systèmes. Les opérateurs peuvent détecter des situations anormales, réagir à la survenance d'événements imprévus et pallier certaines défaillances techniques en vue d'éviter un accident. L'être humain est perçu de manière positive à cet égard, les approches modernes de sécurité opérationnelle visant à accroître la capacité d'adaptation et de récupération des systèmes (Hollnagel, 1998).

La prise en compte du facteur humain nécessite une approche multidisciplinaire réunissant des connaissances issues de la psychologie, de l'ergonomie, de la sociologie et de l'ingénierie.

3. Modèles théoriques de la genèse des accidents

L'étude de ces modèles est essentielle pour comprendre les limites des approches traditionnelles et pour défendre l'utilisation d'un facteur humain dans une méthode avancée comme H-HAZOP.

I. Le modèle de Heinrich revisité : de la causalité linéaire à la critique systémique

Heinrich Heinrich (1931), son modèle, souvent projeté sous la forme d'une rangée de dominos, est l'un des premiers cadres de l'analyse accidentelle, qui a été appelé cadres. Elle repose sur la prémisse que les accidents sont le produit d'une chaîne d'événements qui sont interdépendants, chaque élément étant une condition préalable à la prochaine. Selon ce modèle, la séquence prototypique se compose de cinq étapes : l'environnement social, l'erreur humaine, l'action de danger, la blessure et la blessure.

Ce modèle offre un intérêt pédagogique significatif en ce qu'il permet de visualiser l'activité des accidents et de localiser les points d'intervention possibles.

Toutefois, il a été largement discuté dans la littérature à jour que les limites de cette approche sont sujettes à débat. Il est partiellement basé sur une vision déterministe et linéaire des accidents, et ne se reflète pas dans la complexité des systèmes de remplacement industriels actuels. D'autre part, elle est encline à mettre en évidence la responsabilité des accidents sur les individus, en négligeant le rôle des facteurs organisationnels et contextuels qui façonnent le comportement.

II. Le modèle de Reason (1990) : approche systémique des défaillances humaines

L'un des principaux modèles développés par R. Reason, appelé "Swiss Cheese Model", est une contribution significative à l'étude des accidents industriels. En opposition avec les schémas linéaires d'analyse, le modèle présenté par R. Reason donne lieu à une conception systémique des accidents, considérés comme étant l'issue de la concordance des erreurs multiples dans le système (Reason, 1990).

Selon ce modèle, le système est visualisé sous forme de chaines de barrières de sécurité, qui ont pour but la prévention et la limitation des dommages dus au danger. Les barrières de ce type peuvent avoir un caractère technique (barrières de sécurité), humain

(qualification des opérateurs) et organisationnel (procédures et culture de sécurité). Cependant, les barrières de protection de cette nature contiennent aussi des points faibles, qui peuvent être identifiés aux "trous" dans les "couches de fromage".

Étiquetées par R. Reason dans la manière suivante :

• **Actives** : les erreurs et violations des opérateurs, perçues à l'état d'activité ;

• **Latentes** : faiblesses structurelles du système (mauvais design, mauvaise formation, surcharge de travail), enracinées dans des décisions organisationnelles.

Dans le cas où toutes les deux sortes d'erreurs se concrétisent et se "concordent", la chaîne de protection contre le danger sera transpercée, conduisant à l'accident. Cela montre que les erreurs humaines ne sont que les manifestions visibles de problèmes organisationnels beaucoup plus sérieux (Reason, 1990). Cette approche a un intérêt important pour la prévention : les stratégies de ce genre doivent non seulement se concentrer sur la réduction des erreurs humaines, mais aussi améliorer l'organisation des barrières et éliminer les défaillances latentes.

III. Le modèle SRK de Rasmussen (1983) : analyse cognitive des comportements

Il s'agit du modèle SRK (Skills-Rules-Knowledge) de Rasmussen (1983). Il s'agit d'un cadre théorique de la description du comportement humain, en se fondant sur le niveau de ses processus cognitifs. On identifie trois niveaux des performances selon leurs caractéristiques et modes de traitement de l'information (Rasmussen, 1983) :

• Le niveau de la compétence (skill based) est associé à l'exécution automatique des actions, ne nécessitant pas d'efforts conscientes. Les erreurs au niveau peuvent être considérés comme de l'ordre des lapsus ou omissions.

• Le niveau des règles (rule based). Aux actions du type il se rapporte le travail des opérateurs avec la participation des procédures et règles préétablies. Les erreurs peuvent être causées par la mauvaise interprétation ou sélection des règles.

• Le niveau des connaissances (knowledge based). Le niveau implique la prise de décision dans des situations inattendues et nouveaux qui requièrent analyse et évaluation.

Ainsi, en tenant compte de ce cadre, il devient évident que la nature des erreurs humaines dépend largement de son contexte cognitif.

IV. La théorie du comportement planifié (TPB) : approche psychosociale des comportements de sécurité

Selon cette théorie, l'intention d'un individu définit son comportement, qui est également influencé par trois facteurs clés, son intention étant influencée par eux :

- **Attitudes (ATT)** : impression des avantages et des inconforts du comportement.
- **Normes subjectives (SN)** : murs de la pression perçue sociale pour accepter ou rejeter un comportement.
- **Contrôle comparatif percevoir (PBC)** : perception de la capacité d'atteindre le comportement.

Des études empiriques ont montré que ces facteurs ont des effets importants sur les comportements de sécurité, en particulier l'utilisation d'engins de protection individuelle. Normes subjectives (Des meta-Analyses Allegro Surgunt) : da 25 à 30 % des variances des comportements de sécurité sont expliquées par les normes subjectives.

V. Implications pour l'analyse des risques

En intégrant ces modèles dans le processus d'analyse des risques on adopte une approche à plusieurs dimensions qui considère les échecs du processus technique, les erreurs humaines, etc., ainsi que les facteurs organisationnels et psycho sociaux. Une telle approche méthodologique se prête bien au cadre d'analyse des déviations liées aux causes d'action humaines typiques de l'étude HAZOP (en tenant compte du contexte humain d'activité dans le monde).

4. Typologie des erreurs humaines et comportements

L'identification et la classification des erreurs humaines relèvent d'une étape cruciale dans l'étude des accidents industriels. En effet, la compréhension des mécanismes propres aux erreurs humaines permet de développer une stratégie de prévention efficace pour chaque type d'erreur.

I. Erreurs vs Violations

Une question essentielle en analyse de l'influence des comportements humains sur les accidents est celle de la différence entre les erreurs et les violations intentionnelles (Reason, 1990).

Les erreurs correspondent à des actes non intentionnels conduisant à des résultats inattendus. Les erreurs résultent le plus souvent d'un défaut cognitif ou de limitations dans la manipulation de l'information. On distingue deux types d'erreurs :

• **Les lapsus (slips)** : erreurs d'exécution liées à des tâches routinières, causées par une baisse d'attention.

• **Les omissions (lapses)** : oubli de réaliser une action indispensable dans un cycle de tâches.

Les violations, en revanche, sont à prendre au sens de délibéré enfreignement des procédures. Mais pourquoi certains de ces comportements surviennent-ils ? Parce que les temporalités du travail, la recherche de performances et l'utilité apparente des règles varient beaucoup.

II. Expérience des opérateurs et taux d'accidents

Le lien existant entre l'expérience des ouvriers et la prévalence des accidents présente une complexité importante. En effet, bien que l'on constate des cas d'accidents chez des opérateurs inexpérimentés à cause d'une méconnaissance des procédures de sécurité, on observe également un taux d'accidents important chez les ouvriers expérimentés.

On parle généralement de paradoxe de la routine à ce sujet. La routine et l'habitude peuvent en effet induire une baisse de l'attention des opérateurs, augmentant ainsi leur vulnérabilité aux erreurs d'exécution. Par ailleurs, la maîtrise des procédures peut parfois conduire à leur contournement afin d'optimiser le travail. Des recherches empiriques ont montré que les travailleurs avec moins de 1 an d'expérience sont victimes de 3 fois plus d'accidents que leurs collègues chevronnés. Mais en tout état de cause ils demeurent exposés. (Déjà chez Dekker, 2014, pp. 389–396.)

III. Cécité attentionnelle et autres limitations cognitives

La cécité attentionnelle est une notion particulièrement importante dans la prise en compte des limitations cognitives des opérateurs industriels. Elle désigne l'incapacité à percevoir un stimulus pourtant visible lorsque l'attention est concentrée ailleurs.

Dans les environnements industriels complexes, la surcharge d'informations peut amener les opérateurs à se focaliser sur certains éléments en négligeant d'autres signaux critiques. Cela réduit la capacité à détecter des situations dangereuses et augmente le risque d'accident. Ce phénomène est étroitement lié à d'autres limites cognitives comme la surcharge mentale, la baisse de vigilance et la réduction des capacités de mémoire de travail. Ainsi ces effets sont exacerbés en cas de stress et de fatigue ; ceci implique l'importance d'une dimension « cognitive » dans la conception de systèmes industriels (Kahneman, 2011)

IV. Facteurs techniques

L'analyse des erreurs humaines doit également intégrer l'influence des équipements et des processus de travail. La conception des systèmes joue un rôle majeur dans la probabilité d'occurrence des erreurs. Des interfaces mal conçues, des consignes ambiguës ou des équipements inadaptés peuvent favoriser les erreurs. Il s'agit notamment des interactions homme-machine.

De plus, les facteurs organisationnels tels que la planification des tâches, la gestion du temps et la répartition des responsabilités influencent fortement les comportements. Une organisation déficiente peut engendrer stress, surcharge et fatigue, augmentant ainsi les risques d'erreur et de violation.

V. Comportement à risque et analyse statistique

Les analyses statistiques montrent que le facteur humain est impliqué dans 80 à 90 % des accidents industriels. Les études empiriques mettent également en évidence le rôle des facteurs psychosociaux dans les comportements à risque. Des éléments comme le stress, les conflits travail-famille ou encore le déséquilibre entre effort et récompense sont associés à une plus grande probabilité d'accident (Barkhordari et al., 2019). Enfin, la fatigue

constitue un facteur aggravant majeur, augmentant le risque d'accident d'un facteur trois, un niveau comparable à celui d'un taux d'alcoolémie de 0,5 g/L

VI. Implications pour la prévention des accidents

En effet, l'établissement des types d'erreurs humaines permet une orientation des stratégies de prévention en fonction de la nature des erreurs. Il s'agit ici de montrer que pour répondre au problème de ces erreurs, une stratégie différente doit être mise en place, qui fait appel à trois types d'actions : action technique (améliorer les interfaces), action organisationnelle (diminuer le stress, climat de sécurité) et enfin action comportementale (formations). En ce qui concerne la méthodologie de H HAZOP, la présentation de ces types d'erreurs humaines constitue une étape cruciale dans la détection des déviations par rapport aux actions humaines.

5. Facteurs cognitifs et individuels

Il s'agit là d'une partie de l'étude des facteurs cognitifs ou humains : la reconnaissance vitale du rôle du facteur humain au sein de la sécurité industrielle. Tels sont les facteurs jouant ainsi un rôle déterminant perception du danger, traitement de l'info. Là où les analyses habituelles mettent en avant les erreurs apparentes. Des études récentes sur la littérature pointent vers l'importance des facteurs internes dans la genèse d'un accident.

I. Stress professionnel

Est considéré comme l'un des plus mauvais déclencheurs d'accident le milieu industriel. L'effet du médiateur du stress sur la profession de la relation entre facteurs de l'organisation et accident a fait preuve de sa puissance dans la littérature scientifique actuelle. Donc le stresse occupationnel a en fait son influence à l'effet et se confirme comme tel via une certaine analyse statistique avec son coefficient régression positif. Le stress professionnel affecte consciemment l'attention multiple d'une personne (diminution : incapacité de se concentrer et d'assurer une vigilance permanente), diminue également la

mémoire de travail (impossibilité de traiter plusieurs informations à la fois), ou déforme sa stratégie de prise de décision (préférer des solutions en profondeur à une simple meilleure solution). Des implications se trouvent là pour les environnements de l'industrie qui exigent une décision rapide.

II. Rôle de médiateur du stress au travail dans les accidents.

Une des autres contributions importantes aux travaux actuels est celle du rôle de la médiation du stress dans l'étude d'accidents industriels. Certaines études récentes ont démontré qu'il y avait un ensemble d'éléments tels que la lutte du travail contre la famille, l'inadaptation effort/récompenses ou encore le lieu du contrôle qui ont des effets indirects sur les accidents au travail par leur influence sur le niveau de stress du travailleur. Ainsi le stress constitue-t-il un mécanisme intermédiaire reliant des conditions du travail à comportement à risque. Mais, cette méthodologie pourrait contribuer à l'explication des variations du taux d'accident constatées au sein des organisations indépendamment de leurs caractères techniques.

III. Sens des comportements de contrôle et de sécurité.

Définition de Micelle Le locus de contrôle, tel que formulé par Rotter, nous amène au sens que les individus ont de leur capacité à façonner les événements. Il est subdivisé en deux grandes orientations :

• **Locus interne :** la croyance que des événements supposent l'effet d'actions internes**.**

• **Locus Externe :** sensation que des évènements sont attribuables à d'autres causes externes.

La revue de la littérature montre que les personnes avec un locus interne tendent à internaliser des comportements plus surs, par opposition, on observe une perte du sens du contrôle et augmentation du comportement à risque pour les gens avec locus extérieur. De plus la littérature précise que le lieu du contrôle affecte aussi le niveau de stress : les

personnes ayant une interne locus sont sujettes au moindre impact par les facteurs induisant le stress et ceci abaisse la probabilité d'accidents.

IV. Santé générale fatigue.

Tout changement de l'état de santé se produit avec une diminution du niveau au total des capacités aussi bien cognitives que physiques de manière à accroître la possibilité d'erreur. Et dans la vie industrielle, la fatigue est le dialogue, en particulier, Cela peut se référer à une durée prolongée, à travailler dans un endroit lointain, ou le manque de sommeil. Sa modification affecte immédiatement la vigilance, la coordination et les effets de réactivation. Dans l'environnement à risque élevé, ces impacts peuvent se transformer en niveaux graves, en particulier en cas d'urgence. Dont une diminution de la vigilance par 20-30 pour cent. Déplais la vigilance, et doublement de l'intervalle de rapport.

6. Facteurs organisationnels et psychosociaux

Comparativement à l'approche de la convention ancrée dans diverses considérations de nature technique, les recherches actuelles montrent qu'un état d'organisation joue souvent un rôle de premier plan parmi les causes des accidents industriels. C'est un facteur qui influence les facteurs comportementaux et cognitifs chez les travailleurs tels que le stress, la motivation et la sensibilisation au danger.

I. Le climat de sécurité (Safety Climate)

La théorie de la sécurité climatique implique la façon dont les employés considèrent la priorité accordée à la sécurité sur leur lieu de travail. Cette idée est en corrélation avec la primauté de l'administration et les normes non parlées qui ont une incidence sur le comportement des employés. Une analyse empirique révèle qu'il existe un lien étroit entre le climat de sécurité d'une part et les comportements des sécuritaires tels que l'utilisation d'équipements de protection contre les personnes ou le respect de mesures de sécurité ad hoc.

II. Le modèle effort récompense et la motivation au travail.

Le modèle effort paye, conçu par Siegrist est un ensemble de théories qui jouent un rôle important dans l'étude des facteurs psychosociaux liés au travail. Elle repose sur l'idée que le déséquilibre entre le travail des ouvriers et les récompenses obtenues (salaires, avantages, sécurité de l'emploi) peut donner lieu à des tensions et à des comportements à risque. Lorsque l'organisation peut sentir une injustice, les travailleurs peuvent commencer à subir une perte de motivation, une augmentation du stress ainsi qu'une réduction de l'engagement envers le code de conduite de sécurité. Les études ont montré qu'un tel déséquilibre est lié à une augmentation de la probabilité d'accidents, en particulier dans l'environnement où il y a une forte pression de production.

III. Conflit travail famille et impact sur la sécurité

La famille de travail de L'antagonisme est un facteur psychosocial digne de considération et est généralement ignorée dans l'analyse de la sécurité industrielle. Elle est créée lorsque les exigences professionnelles entrent en conflit avec celles des responsabilités personnelles, ce qui provoque une surcharge de la mentalité et des sentiments. Ce conflit peut entraîner une diminution de la concentration, une augmentation du stress et un épuisement. Selon les études observées, les données expérimentales suggèrent que le conflit entre le lieu de travail et la famille a des effets indirects sur les accidents en raison de son impact sur le stress. Il s'agit donc d'un facteur important qui explique les modèles de médiation du risque.

IV. Formation, compétence et supervision.

La formation et la supervision font partie des acteurs clés de la prévention des accidents dans les industries. Une formation insuffisante peut conduire à une mauvaise compréhension des procédures, une mauvaise utilisation de l'équipement ou l'incapacité de devenir des intervenants dans l'état d'urgence. La supervision, à son tour, permet de renforcer les comportements qui peuvent être considérés comme sûrs en s'assurant que les règles sont respectées et en fournissant une rétroaction aux opérateurs. Les études ont

révélé que le manque de formation est l'un des facteurs les plus importants dans la survenue d'accidents, en particulier chez les travailleurs débutants. En outre, une surveillance inefficace peut permettre l'évolution de pratiques informelles et de comportements à risque.

V. Culture organisationnelle et comportements de sécurité

La culture organisationnelle est la totalité des valeurs, des croyances et des normes partagées par les membres d'une organisation. Elle affecte radicalement des comportements des personnes, surtout en matière de sécurité. Une structure de culture forte implique une hiérarchisation de la sécurité par rapport à la production, une faible tolérance par rapport aux comportements dangereux, une responsabilité accordée à la main-d'œuvre et un apprentissage organisationnel basé sur l'incident. À l'inverse, une structure culturelle orientée peut encourager la main-d'œuvre à prendre des risques pour atteindre les objectifs de production.

VI. Interaction entre facteurs organisationnels et humains

Les facteurs organisationnels n'affectent pas directement un accident, mais les facteurs individuels et, par leur intermédiaire, les comportements. Un exemple de système dynamique serait une action organisée qui influencerait les facteurs individuels influençant les comportements qui influencent les accidents.

VII. Implications pour la méthode H-HAZOP

Un processus H HAZOP permet expressément de documenter l'étude d'analyse des écarts humains en intégrant les facteurs organisationnels comme variables. Il est important que l'analyse des écarts humains comprenne des facteurs organisationnels et psychosociaux.

7. Analyse des accidents industriels

I. Facteurs environnementaux et conditions de travail

Le rôle des conditions d'environnement est très important à l'échelle du niveau de performance et de sécurité d'une personne. En ce qui concerne les facteurs environnementaux, la contrainte thermique donne un bon exemple. On pourrait dire que les vagues de chaleurs et l'environnement à haute température est une caractéristique beaucoup d'entreprises industrie de la construction, production pétrochimique, industrie du travail des métaux, etc. La présence de chaleurs accroît non seulement la charge d'effort mais encore cognitif, entrainant une usure par fatigue et déshydratation, perte d'attention et trouble des fonctions mentales (INRS, 2023). La cause de ces phénomènes est un accroissement des erreurs humaines dans les travaux qui exigent une vigilance soutenue.

II. Analyse par agents matériels et nature des accidents

L'étude statistique des accidents industriels donne une estimation des principaux agents producteurs de l'accident. D'après les données recueillies les agents mécaniques entrent en jeu dans environ 40 à 45 % des accidents, tandis que les chutes de hauteur provoquent les traumatismes importants. Les causes majeures incluent l'électrocution et le fait de bouger des objets. Donc, ces données illustrent l'importance que représente l'interaction entre les opérateurs des machines et les équipements technologiques.

III. Analyse démographique des accidents

Les traits démographiques des travailleurs aident à identifier celles qui sont davantage susceptibles d'être victimes d'accidents dans l'industrie.

a) Sexe : Les hommes sont exposés à davantage d'accidents que les femmes dans la plupart des cas. Cela est avant tout parce que ce sont eux qui forment le plus grand nombre des professions dangereuses. Et de surcroît, il apparaît que les hommes risquent beaucoup plus.

b) Âge : La variable « âge » est aussi déterminante pour bien comprendre la gravité des accidents industriels. Les jeunes travailleurs courent davantage de risques, mais en général,

les accidents sont plus sérieux voire mortels chez les anciens. Ceci s'explique par un déclin des capacités physiques ainsi qu'un processus de réapprentissage lent (Revue ISG, 2020).

IV. Analyse systémique des accidents

Une grande partie de la recherche actuelle qui entoure la thématique de l'accident industriel met en évidence la multi factorialité. Il en est de même pour un accident. Un accident ne découle d'une cause unique mais plutôt d'une combinaison de causes interdépendantes : Organisationnelles, Individuelles et Systèmes Techniques. C'est un point capital à la base du modèle de Reason (1990), mettant en évidence l'idée d'échec latent.

V. Études de cas et validation empirique

Des études de cas à l'échelle industrielle peuvent également valider les modèles de théories proposées dans la première partie de ce chapitre. Voici trois exemples exemplaires :

• **Bhopal (**1984) : Erreurs humaines aggravées par les défaillances de l'organisation (mauvaise formation et maintien négligé).

• **AZF Toulouse (2001)** : violences à procédures et mauvais climat sécuritaire.

• **Texas City (2005) :** fatigue des opérateurs & défaut latent préexistant.

Les données de ces études valident ainsi un regard systémique sur l'accident industriel.

VI. Implications pour la prévention et l'analyse des risques

Sur les conclusions tirées des analyses des accidents industriels on remarque que les principaux domaines à améliorer dans ce qui concerne la prévention sont : prendre en compte les conditions du travail, concevoir mieux les équipements, former et surveiller davantage, constituer une culture de sécurité. Ces points au sein de la méthodologie H HAZOP permettent l'analyse systématique des déviations d'origine humaine et pour les quantifier sur la sécurité des systèmes.

8. Conclusion du chapitre 1

La mise en œuvre de l'étude du facteur humain, dans le contexte de la sécurité de l'industrie, traduit la difficulté d'intégration des trois plans : technique, cognitif et organisationnel. Les conclusions tirées du chapitre précédent permettent d'illustrer le fait que les échecs humains ne peuvent se comprendre qu'à travers leur dimension organisationnelle et technologique.

Les modèles théoriques proposés par Heinrich, Reason et Rasmussen permettent des études complémentaires des accidents. Les études empiriques dans ce champ soutiennent l'importance du rôle jouées par les facteurs cognitifs, individuel et organisationnel dans l'accident industriel, ces dernières sont des variables très importantes expliquant une forte proportion des accidents.

Cette analyse démontre donc la nécessité de mettre en œuvre l'approche systémique intégrant tout un éventail de variables dans les accidents. Dans un tel contexte, la méthodologie H HAZOP représente une extension intéressante de l'approche traditionnelle de l'analyse accidentelle. En ce sens, elle rend possible un apport de dimension humaine dans le rechercher de déviations dans les systèmes. Ainsi, ce chapitre est à l'origine des bases théoriques requises à la présentation de la méthode HAZOP (H) présente dans ce mémoire.

CHAPITRE II

Chapitre 2 La méthode Human Hazop (H-HAZOP)

1. Introduction

Les caractéristiques n'était pas suffisante dans le cas des erreurs humaines, étant donné qu'un tel type de risque ne peut être défini simplement comme une sorte de défaillance technique, mais plutôt comme la manifestation des phénomènes psychologiques complexes (Rasmussen, 1983). C'est pourquoi a eu lieu la formation de nouveaux concepts d'analyse des risques industriels, tels que la technique de l'Human HAZOP (H-HAZOP).

2. Origine et fondements de la méthode HAZOP

I. Contexte historique et développement de la méthode HAZOP

C'est aussi dans les années 1960 que vit le jour la méthode HAZOP (Hazard And Operability Study) chez le groupe chimique britannique ICI, face à l'augmentation de la complexité des procédés qui nécessite la domination des dangers en jeu. Initialement, c'était une façon d'appliquer à un système de procédé industrielle l'analyse systématique de tout état des défaillances en termes de leurs déviations vis-à-vis de ses normales conditions opératoire (Kletz, 1999).

L'hypothèse fondamentale sur laquelle repose la méthode HAZOP est que tous les systèmes sont conçus avec un but particulier (design intent). Toute déviation de cela signifie qu'il y a un danger. Basé sur le principe de l'analyse des conséquences des écarts et comment s'y remettre, la méthode HAZOP est conçue en tant que telle.

Grâce à son aptitude à identifier des dangers potentiels de façon exhaustive, la méthodologie HAZOP s'est rapidement établie en tant que norme de sécurité du secteur chimique-pétrochimique. Plus tard elle a été formellement introduite dans la norme IEC internationale 61882.

II. L'accident de Flixborough (1974) : un tournant majeur

L'accident industriel qui a eu lieu au Royaume montra qu'une erreur de caractère technologique n'était pas la seule responsable, l'essentiel consiste donc à souligner l'avantage des approches structurées pour l'analyse de risques telles que le HAZOP. L'Accident de Flixborough est de ce fait devenu un tournant dans la pratique industrielle d'analyse des risques (CCPS, 2008).

III. Concepts fondamentaux du HAZOP

La méthode HAZOP utilise pour ses analyses plusieurs notions clés :

- **Nœud (Node)** : Section de l'espace dans un système à séparer
- **Paramètre** : La valeur physique ou opérationnelle d'un système (Débit, pression et etc.).
- **Déviance** : écart par rapport aux conditions standards.

Des déviations peuvent être identifiées en employant des mots-guides (« plus », « moins », « sans », etc.) et des mots inverses qui aident à étudier les diverses possibilités d'occurrences de défaillance selon une approche systématique.

Il s'agit là d'une démarche qui garantit un examen complet de la dangerosité de l'installation en question.

IV. Le rôle de l'équipe multidisciplinaire

Une des forces de la méthode est la formation d'une équipe avec spécialiste issu de plusieurs disciplines telles que l'ingénieur, opérateur, spécialiste de sécurité et instrumentation. Il se trouve que cette multiplicité des points de vue enrichit et diversifie d'autant davantage le traitement analytique qui traite bien tout à la procédure.

Un élément dans l'étape de la méthode HAZOP d'analyse des déviations possibles pour le système s'appuie sur des sessions de « brainstorming ». Celles-ci, menées par un Coordinateur (Leader) bien entraîné, sont d'une importance capitale, faisant partie intégralement de la Méthode elle-même. Conformément aux travaux du CCPS, la qualité de la discussion et par conséquent de l'analyse, dépend fortement sur la nature de ceux qui

participent dans le processus, ainsi que sur la qualité de leadership du coordonnateur (CCPS, 2008).

V. Normalisation et cadre industriel

Comme pour les autres modes d'analyse, la HAZOP aussi à petit à petit évolué au moyen de la normalisation. À ce jour, c'est la norme IEC 61882 qui fournit la définition de base de l'exécution d'un exercice HAZOP avec ses principes méthodologiques, ses étapes et sa documentation.

De plus, on trouvera dans les guides du CCPS (Centre de sécurité des procédés chimiques) beaucoup d'indications concernant le maniement de cette méthode en industrie chimique. Enfin ils mettent aussi en avant l'intérêt d'intégrer le HAZOP dans une démarche plus générale de gestion des risques industriels notamment intégrant MOC).

VI. Limites du HAZOP classique

On doit reconnaître certaines limites à la méthode. Pour commencer, c'est tout à fait centré juste sur la question du système technique en faisant abstraction des questions humaines et organisationnelles. Car ce sont eux qui jouent souvent le rôle majeur dans des incidents industriels.

3. Extension au facteur humain (H-HAZOP)

I. Limites du HAZOP technique

Bien que la méthode HAZOP soit puissante en tant qu'outil de détection d'erreurs techniques, il y a des limites sur son application à une analyse des systèmes sociotechniques. De fait, c'est d'une étude de ces paramètres physiques (et équipement) qu'est issue en général la méthode classique en partant du postulat tacite que les comportements humains sont fiables voire secondaires.

Néanmoins, diverses analyses d'accidents nous montrent que les erreurs humaines sont déterminantes pour la survenue d'événements indésirables (accidents industriels). Les

erreurs que nous faisons ne peuvent pas être simplement mises à cause de défauts techniques Les processus cognitifs complexes et les conditions organisationnelles les génèrent (Reason, 1990). L'étude classique des dangers et de l'opérabilité n'a pas pu détecter.

• La mauvaise compréhension de l'alarme est une erreur de perception.

• L'erreur de prendre une décision inappropriée dans une situation ambiguë.

• Négligence pour remplir une fonction importante.

• un manquement délibéré à la procédure

De plus, cette approche ignore des facteurs contextuels comme la charge de travail, le stress ou la culture organisationnelle qui influencent fortement la performance humaine (Rasmussen, 1983).

Par conséquent, si l'analyse se limite à des défaillances techniques, elle donne une vue partielle des risques. Cela nécessite des propositions de méthodes qui intègrent explicitement le facteur humain.

II. Émergence du Human HAZOP

Une extension de la méthode a été élaborée pour intégrer les aspects humains à l'analyse des risques liés au processus.

Cela implique une extension des principes HAZOP aux actions humaines. Il est vrai qu'ils peuvent s'écarter de l'intention de la tâche. Il ne s'agit donc plus d'un examen des défaillances de l'équipement, mais de défaillances des tâches prises séparément. Le H-HAZOP est une approche systémique. Les erreurs humaines considérées dans cette méthode sont le résultat d'interactions entre :

- Les capacités cognitives de l’individu
- les conditions de travail
- les contraintes organisationnelles

Cette approche est cohérente avec les modèles de sécurité développés par Reason (1990), qui mettent en évidence le rôle des défaillances latentes dans la genèse des accidents.

III. Le concept de « nœud social »

Un des contributions importantes du H-HAZOP est l'introduire le concept de « nœud social ». À la différence d'un HAZOP traditionnel où les « nœuds » sont des éléments physiques (tuyauterie, etc.), le H-HAZOP considère des acteurs individuels ou des groupes de travail comme des unités d'analyse.

Un nœud social peut correspondre à :

• un opérateur en salle de contrôle

• une équipe de maintenance

• un superviseur

• un groupe de décision

Cela permet à quelqu'un de comprendre les interactions humain-organisationnel ainsi que la possibilité des déviations dans le travail. Par exemple, une déviation peut correspondre à :

• une mauvaise transmission d'information

• une coordination insuffisante entre équipes

• une interprétation erronée d'une consigne

De ce fait la notion de nœuds sociaux va permettre d'étendre l'analyse HAZOP sur les dimensions organisationnelle et communicationnelle du système.

IV. Fiabilité humaine et processus cognitifs

Inclusion du facteur humain dans le HAZOP, a besoin d'une compréhension profonde des mécanismes cognitifs en jeu dans la performance de l'opérateur. Les travaux de Rasmussen (1983), puis de Hollnagel (1998), ont permis de distinguer plusieurs fonctions cognitives essentielles :

- **Perception** (détection de l'information pertinente dans l'environnement)
- **Attention** (sélection de l'information à traiter), mémoire (stockage et récupération de l'information utile à l'action)
- **Décision** (choix d'une action entre plusieurs alternatives)

Ces fonctions dépendent de la charge cognitive, à savoir la quantité d'information que l'individu doit traiter à un moment donné. Une surcharge cognitive peut engendrer des erreurs d'interprétation, des erreurs d'interprétation, des erreurs de décision, etc. Les préjugés cognitifs jouent également un rôle important. Ils influencent la perception du risque et la prise de décisions. Le biais cognitif, tel que le biais de confirmation par exemple, peut amener un opérateur à ignorer l'information d'une façon minoritaire qui va à l'encontre de son hypothèse initiale (Kahneman, 2011).

V. Apports du H-HAZOP dans la gestion des risques

Une première conséquence par ce fait est que la façon H-HAZOP devient consacrée. Et vraiment : Le H-HAZOP ajoute à la valeur de la performance de procédé traditionnel car il fournit

- Une meilleure identification des erreurs humaines potentielles
- Améliorer la manière d'intégrer dans le système notre prise en considération de l'influence organique.
- Une meilleure connaissance de la nature des phénomènes homme-machine, spécialement durant les phases conception.
- Un bon moyen d'accroitre la connaissance des choses et la prise de conscience à l'enjeu de la sécurité.

4. L’analyse des tâches : le pivot de la méthode

I. L’Analyse Hiérarchique des Tâches (HTA)

L’analyse des tâches est l'étape d'une importance primordiale dans l'utilisation de la méthode H-HAZOP ; cela parce qu'elle segmente l'activité humaine en éléments analysables. Par opposition aux systèmes techniques, on ne peut observer sous une forme de paramètre physique l'action humaine et il faut la décomposer en séquences logiques pour identifier de potentielles déviations.

La Hierarchical Task Analysis (HTA) ou l'analyse hiérarchique des tâches est une technique très répandue afin de décrire des activités humaines. Celle-ci est définie comme le processus de réduire des objectifs généraux en un ensemble de tâches basiques, regroupés dans une structure hiérarchique, avec mise en lumière des interrelations (Annett, 2003).

Les étapes du processus HTA sont : Identifier la tâche globale Décomposer la tâche en tâches élémentaires Définir les plans pour l'exécution Décrire les conditions de réalisation À titre d'exemple, si nous considérons une tâche quelconque dans le contexte industriel, comme par ex. « démarrage d'un réacteur », il est possible de la décomposer en les étapes suivantes : « 1. Vérifier les paramètres initiaux, 2. Ouvrir les vannes, 3. Activer le système de chauffage, 4. Surveiller les indicateurs ».

II. Analyse des fonctions cognitives (modèle CREAM)

Il est également important que, au-delà de la décomposition des tâches, l'on étudie les processus cognitifs sous-tendant leur réalisation. Le CREAM (Cognitive Reliability and Error Analysis Method) est le nom du système d'Hollnagel (1998). Il s'agit également d'un cadre de référence.

Ce modèle identifie quatre fonctions cognitives principales :

• **Observation** : perception des informations disponibles

• **Interprétation** : compréhension de la situation

• **Planification** : élaboration d'une stratégie d'action

• **Exécution** : réalisation des actions

Toutes les étapes sont susceptibles à créer un sort d'erreurs particuliers, comme : non-détection d'un signale critique, ou compréhension erronée d'une alarme. En intégrant le modèle CREAM au H-HAZOP nous pouvons identifier les défauts potentiels de chaque étape du processus cognitif.

III. Conditions de performance (CPC – Common Performance Conditions)

Les performances humaines sont affectées par une collection de facteurs, appelés conditions de performance (CPC), et influent sur la fiabilité des actions. Ces facteurs sont

nécessaires dans l'examen HAZOP : ils nous aident à expliquer les circonstances pour lesquelles une faute pourrait se produire.

Hollnagel a écrit que les facteurs organisationnels comme l'évaluation environnementale comprennent la bonne qualité de l'environnement, un haut degré d'entraînement, la présence des procédures adéquates, une charge de travail élevée, la pression du temps et la bonne communication. Les facteurs peuvent être catégorisés comme suit : Individuels, Organisationnel ou Environnemental.

IV. Intégration HTA–CREAM dans le H-HAZOP

Un aspect significatif de H-HAZOP réside dans son intégration des méthodes HTA et CREAM à un formalisme de gestion des risques. Cette intégration est faite par quatre étapes : Décomposition de la tâche, Fonctions cognitives, Application des mots-guide ainsi qu'Analyse des causes et conséquences.

V. Apports de l'analyse des tâches dans le H-HAZOP

L'analyse de tâche est un composant clé du H-HAZOP à cause d'une meilleure organisation du travail, identification plus aisée des erreurs, lien entre erreur et condition de travail ou encore mesures préventives améliorées.

5. Les mots-guides humains

I. Réinterprétation des mots-guides classiques

Dans le schéma d'analyse HAZOP classique, on applique des mots-guide comme « Aucun », « Plus », « Moins », ou « Inversé » sur les variables physiques. Dans le contexte de H-HAZOP, ces mots ont une nouvelle signification. « Par exemple, » dit la Machine, « aucun, plus, moins et inverse. Tous ne désignent pas que l'action qui est omise, excessive, insuffisante ou inversée. ».

II. Mots-guides temporels et séquentiels

On introduit des mots-guide spécifiques d'analyse des déviations temporelles : « trop tôt », « trop tard », « avant » ou « après ». Ces déviations deviennent tout à fait critiques dans les systèmes de séquences qui nécessitent un ordre particulier pour être sûrs.

III. Mots-guides qualitatifs et cognitifs

La méthode H-HAZOP utilise les mots guide comme « autre que » (mauvaise cible), « en plus de » (action non planifiée), « partiellement » (action partielle), « incorrectement » (mauvais mode opératoire).

IV. Intégration dans la démarche H-HAZOP

Chacune des tâches identifiées dans une analyse de travail à l'homme (HTA) est étudiée en utilisant des mots-guides. Appliquer un processus dans lequel vous choisissez une tâche ; vous appliquez des mots-guide ; vous identifiez les écarts ; et vous analysez leurs causes et conséquences.

6. Procédure détaillée du H-HAZOP

I. Préparation de l'étude et composition de l'équipe

Cette équipe devrait être multidisciplinaire avec un leader, expert procédé, opérateur expérimenté, spécialiste facteur humain et responsable santé sécurité environnement (HSE).

II. Déroulement des sessions d'analyse

Chaque session repose autour d'un brainstorming structuré : définition de la tâche, souvenir de l'attention, mise en application des mots-guide, identifier les écarts puis discuter causes & effets.

III. Identification des causes des déviations

Techniques (défaut d'équipements), humaines (manque de perception, mauvaise prise de décision), organisationnelles (procédure inadéquate), environnementales (chaleur, bruit, fatigue).

IV. Élaboration des recommandations

Des recommandations peuvent être regroupées sous barrières « techniques » (systèmes automatisés, « organisationnelles » (procédure, formation, etc.) et cognitives/ergonomiques.

V. Documentation et suivi

Le rapport final doit inclure : la description des tâches, les déviations identifiées, les causes et conséquences et les mesures recommandées.

7. Limites et défis de la méthode H-HAZOP

I. Nature heuristique de la méthode

En dépit de ses nombreuses contributions, l'approche H-HAZOP connait des limites propres aux approches basées sur l'heuristique. C'est d'autant plus vrai que, à la différence des approches quantitatives, H-HAZOP s'appuie surtout sur ses sessions de réflexion collective ainsi que sur les participants.

Cette caractéristique implique que :

- L'identification des déviations est grandement influencée par la connaissance d'une équipe.
- Certaines situations peuvent ne pas être envisagées
- L'analyse peut varier d'un groupe à un autre

De même, le manque de cadre mathématique rigoureux entrave la reproductibilité des résultats et introduit potentiellement un biais d'évaluation du risque (CCPS, 2008).

II. Dépendance à l'expertise et aux ressources

Il faut énormément de temps et d'expertise pour mettre en place le H-HAZOP ; c'est un processus fastidieux. Le passage au crible détaillé des tâches joint à un examen des facteurs cognitifs fait une méthode très laborieuse.

Les principales contraintes sont :

• mobilisation d'une équipe multidisciplinaire

• durée des sessions d'analyse

• besoin d'expertise en facteurs humains

Ces exigences peuvent se révéler être un obstacle à l'application d'un usage systématique de la méthode dans des environnements industriels aux ressources limitées.

III. Difficulté de modélisation des comportements humains

Le comportement humain est à lui seule variable et soumis à beaucoup de circonstances. Cette variabilité rend leur modélisation particulièrement complexe.

Les actions de l'Homme ne suivent pas toujours des règles comme ceux des systèmes techniques. Ces facteurs sur lesquels elles peuvent être influencées sont : émotionnel, cognition ou organisationnel. Cette complexité rend difficile pour le H-HAZOP d'anticiper de façon complète les erreurs commises par des humains (Rasmussen, 1983 ; Kahneman, 2011).

IV. Risque de normalisation des déviations

Autre problème majeur : le phénomène de « normalisation des déviations » tel que discuté dans la littérature sur la sécurité. Ceci est appelé « l'acceptation par la pratique répétée ». Cela s'est produit avec certaines choses qui étaient anormales mais devinrent normales.

Concrètement dans le cadre d'un H-HAZOP, on parle ici de sous-estimation de certains dangers, de banalisations d'écarts à la procédure ou de perte de vigilance au niveau de l'équipe HAZOP. Et c'est précisément ce qui explique le besoin d'une solide culture de la sécurité et d'un questionnement permanent des pratiques (Dekker, 2014).

V. Limites qualitatives et besoin de quantification

Le H-HAZOP est une approche essentielle qui est qualitative. Bien qu'elle autorise d'établir les risques, elle ne fournit pas d'évaluation probabiliste réglage fin de leur existence. Cette limite est particulièrement problématique dans le cadre des systèmes complexes dont la prise de décision nécessite une hiérarchisation plus fine des risques.

Dans ce cadre, un certain nombre d'auteurs suggèrent que le H-HAZOP soit complété par des méthodes quantitatives telles que l'utilisation des réseaux bayésiens qui peuvent saisir les relations de causalité, intégrer l'incertitude et quantifier la probabilité d'erreur. Cette combinaison constitue une avancée potentielle vers l'amélioration de la force des analyses de risque.

8. Conclusion du chapitre 2

C'est le H-HAZOP qui représente réellement un grand pas en avant dans les techniques de gestion et d'analyses des risques où le facteur humain est considéré au cœur même de la « détection de l'écart ». Prenant comme fondement le HAZOP classique, cette méthode permet à l'activité de l'homme de se faire analyser avec une meilleure systématisation et organisation.

Les sections au-dessus ont souligné les apports du H-HAZOP notamment : intégration des connaissances du processus, considération de l'organisation et raffinement de l'appréhension homme-machine.

Pourtant cette approche connaît également ses propres limites pas moindres entre elles le fait qu'elle soit qualitative et s'appuie sur les analystes expertise. De telles limites soulignent l'utilisation croissante de tels compléments aux approches qui sont en mesure de quantifier les dangers et d'établir les modèles.

En ce qui concerne cela, le prochain chapitre traitera de l'utilisation concrète du H-HAZOP, ainsi que de l'incorporation de méthodes quantitatives (les réseaux Bayésiens en particulier) pour améliorer la qualité et la significativité de l'analyse des risques.

CHAPITRE III

Chapitre 3 Modélisation probabiliste des risques par Réseau Bayésien

1. Introduction

L'analyse des risques industriels a connu un changement important au cours des dernières décennies, vers un changement dans les méthodes d'analyse déterministe des défaillances d'éléments matériels vers celles basées sur des modèles probabilistes avec la capacité de tenir compte de l'incertitude et de la complexité des sociotechniques des systèmes. Les méthodes traditionnelles, comme les arbres de défaillances (Fault Tree Analysis - FTA) ou les arbres d'évènements, bien qu'utiles pour représenter un simple ensemble de logiques d'enchaînements, ont des contraintes importantes lorsqu'il s'agit de décrire des interactions multiples, voire des influences dépendantes conditionnellement ou humaines (Villemeur, 1992 ; Bedford et Cooke, 2001).

Dans les systèmes de l'industrie moderne, où la forte interdépendance des composantes des technologies avec les opérateurs des personnes et les structures organisationnelles sont caractéristiques, ces limites se transforment en critiques. Les modèles de déterminisme, en particulier, supposent l'indépendance des événements dans la plupart des cas et ils ne permettent pas de considérer les incertitudes liées à l'information ou l'opinion incomplètes des spécialistes.

Dans ce contexte, les réseaux bayésiens (RB) sont une avancée méthodologique accrédite dans la pensée basée sur la théorie des probabilités et le processus de pensée bayésien. Présenté par Pearl (1988), bayes niel réseaux permet la représentation d'un ensemble de variables choisies au hasard, sous la forme d'un graphique acyclique orienté, où les dépendances entre elles sont parfaitement algébriques. Cette construction ne fournit pas seulement un modèle intuitif des relations causales, mais permet aussi un modèle rigoureusement formalisé.

2. Fondements de la théorie des probabilités

I. Importance des probabilités dans le H-HAZOP

Dans le cadre du H-HAZOP, les probabilités sont essentielles pour quantifier l'identification des erreurs chez l'homme, hiérarchiser les scénarios de risque et évaluer l'efficacité des mesures préventives. L'intégration des réseaux bayésiens permet donc de convertir une analyse qualitative (HAZOP/H-HAZOP) en une analyse probabiliste, ce qui permettrait de mieux soutenir la prise de décision.

3. Structure et formalisme des réseaux bayésiens

I. Définition et composants d'un réseau bayésien

Un réseau bayésien (RB) est un modèle graphique probabiliste qui permet de modéliser un ensemble de variables qui sont a priori en corrélation imparfaite et le mandat des conditions de leurs dépendances associées. Il se compose de deux parties principales : une structure graphique et une collection de distributions de probabilités.

La structure graphique est définie par un graphe orienté acyclique (Directed Acyclic Graph – DAG), dans lequel :

- Les **nœuds** représentent des variables aléatoires
- Les **arcs** représentent des relations de dépendance causale

L'absence de cycles garantit la cohérence probabiliste du modèle, en évitant les boucles causales.

Typologie des nœuds

Dans un réseau bayésien, on distingue généralement trois types de nœuds :

1. **Nœuds racines** : ne possèdent pas de parents, définis par des probabilités a priori
2. **Nœuds intermédiaires** : possèdent des parents et des enfants, représentent des variables dépendantes
3. **Nœuds feuilles** : ne possèdent pas d'enfants, représentent souvent des conséquences ou des résultats

Exemple dans un contexte HSE

Un réseau bayésien simplifié peut inclure les variables suivantes : erreur humaine, défaillance technique et accident. Dans ce cas, « erreur humaine » et « défaillance technique

» sont des nœuds parents, et « accident » est un nœud enfant. Ce type de représentation permet de modéliser explicitement les relations causales entre les événements.

II. Indépendance conditionnelle

L'un des concepts fondamentaux des réseaux bayésiens est l'indépendance conditionnelle. Elle permet de simplifier considérablement la représentation des probabilités dans des systèmes complexes. Deux variables A et B sont conditionnellement indépendantes sachant une variable C si :

$P(A, B \mid C) = P(A|C) \times P(B|C)$

Dans un réseau bayésien, cette propriété est utilisée pour factoriser la distribution de probabilité jointe.

Factorisation de la distribution jointe

Soit un ensemble de variables $X_1, X_2, \ldots, X_n$, la distribution jointe peut être écrite comme:

$P(X_1, X_2, \ldots, X_n) = P(X_i \mid (X_i))$

Cette factorisation constitue l'un des principaux avantages des réseaux bayésiens, car elle permet de réduire considérablement la complexité du modèle.

Intérêt en sécurité industrielle

Dans les systèmes industriels, beaucoup de variables sont dépendantes, mais ce n'est que par certaines des conditions qu'elles dépendent les unes des autres. Pour illustrer davantage, la probabilité d'un accident dépend de l'erreur humaine et de la défaillance technique, les deux termes, mais ne sont pas nécessairement liés directement, car ils ne peuvent avoir d'interaction directe. L'indépendance conditionnelle est donc utile dans le fait qu'elle permet de modéliser ces relations sans surcharger le modèle.

III. Tables de probabilités conditionnelles (CPT)

Chaque nœud d'un réseau bayésien est associé à une **table de probabilités conditionnelles** (Conditional Probability Table – CPT), qui définit la relation entre le nœud et ses parents.

Structure d'une CPT

Pour un nœud X ayant des parents Y_1, Y_2, …, Y_k, la CPT spécifie P ($X \mid Y_1, Y_2, \ldots, Y_k$). Cette table contient toutes les probabilités possibles pour chaque combinaison des états des variables parentes.

IV. Interprétation causale des réseaux bayésiens

Un de mes principaux arguments pour les réseaux bayésiens est qu'ils représentent bien les relations causales. À la différence des modèles purement statistiques, les arcs dans le graphe ont une signification de relation de cause à effet, facilitant l'étude des scénarios accidentels ainsi que l'identification de causes racines et de scénarios théoriques. Cette propriété sera particulièrement utile pour la situation du H-HAZOP ou bien où les facteurs humains technique et d'organisation interagissent l'un avec l'autre.

4. Construction et apprentissage du réseau

Mais le bât blesse dans la construction du propre réseau bayésien : C'est une étape déterminante dont l'issue détermine les résultats obtenus. Cette construction s'appuie essentiellement sur les deux éléments suivants : la définition d'une structure au sein du réseau (relation entre les variables) ; estimation des probabilités (CPT).
Dans l'étape de génération de données pour le contexte HSE et en particulier du H-HAZOP, les données sont généralement très peu nombreuses, voire inexistantes.

I. Apprentissage de la structure

Apprendre la structure est l'opération qui détermine les relations de dépendances entre variables i.e., on cherche la forme du DAG.

a) Approche basée sur l'expertise (Knowledge-driven)

C'est l'approche utilisée le plus souvent dans le champ de la sécurité industrielle. Celle-ci se fonde sur : L'analyse par les experts ; Résultats des études HAZOP / H-HAZOP ; Retours d'Expériences (REX). Les relations causales sont basées sur une compréhension

du fonctionnement du système. Par exemple : stress → erreur humaine → accident. Cette approche est surtout appropriée quand il y a des données historiques limitées.

b) Apprentissage à partir des données (Data-driven)

Quand il y a déjà des bases de données, on peut utiliser des algorithmes d'apprentissage pour créer automatiquement la structure du réseau. Parmi les principaux: PC (Peter Clark's alg.), GES (Greedy Equivalence Search), Hill Climbing. De telles approches peuvent identifier des liens statistiques ; néanmoins elles ont besoin de grandes quantités de données.

c) Approche hybride

Dans l'optique d'HSE, l'approche la plus appropriée est de combiner des connaissances expertes (H-HAZOP) avec les données dont nous disposons. Cette approche contribue à assurer une cohérence causale, à accroître la précision du modèle et à atténuer le biais d'information incomplète.

II. Apprentissage des paramètres

Une fois la structure définie, il est nécessaire d'estimer les probabilités associées aux relations entre variables, c'est-à-dire les tables de probabilités conditionnelles (CPT).

a) Estimation du maximum de vraisemblance (MLE)

La méthode du Maximum de Vraisemblance consiste à estimer les probabilités à partir des fréquences observées dans les données :

$\hat{P}(X|Y) = N(X,Y) / N(Y)$

Où N(X,Y) est le nombre d'occurrences conjointes et N(Y) est le nombre total d'occurrences de Y. Cette méthode est simple et efficace lorsque les données sont complètes.

b) Algorithme Expectation-Maximization (EM)

Dans les situations où les données sont incomplètes (cas fréquent en HSE), l'algorithme EM est utilisé. Il repose sur deux étapes : Expectation (E-step) pour l'estimation des variables manquantes, et Maximization (M-step) pour la mise à jour des paramètres. Cet algorithme permet d'estimer les probabilités même en présence d'incertitude.

III. Intégration de la logique floue

Dans le domaine HSE, de nombreuses informations sont exprimées de manière qualitative, par exemple : « risque élevé », « probabilité faible », « situation critique ». Ces expressions linguistiques peuvent être intégrées dans les réseaux bayésiens à l'aide de la logique floue **(Fuzzy Logic)**.

Principe

La logique floue permet de transformer des variables qualitatives en valeurs numériques à l'aide de fonctions d'appartenance.

Avantages dans le H-HAZOP

Intégrer une logique floue peut être utile pour utiliser des opinions d'experts, pour exprimer et manipuler l'incertitude subjective et améliorer les modèles. Ceci est bien pertinent à considérer en particulier pour les analyses d'H-HAZOP lorsqu'on a peu de données quantitatives.

IV. Difficultés et enjeux de la construction

Construire un réseau bayésien pose différents problèmes : rareté ou manque de données, subjectivité des experts, complexité du modèle et risque de sur-paramétrisation. Des problèmes tels que ceux-là appellent à la nécessité d'une validation rigoureuse du modèle, avec données comparatives réelles, études de sensibilité, validations expertes etc…

V. Apports pour le H-HAZOP

En intégrant les réseaux bayésiens au H-HAZOP on peut quantifier les erreurs humaines, modéliser des interactions complexes ainsi que d'améliorer la prise de décisions. Mais cette combinaison représente un saut qualitatif décisif dans le domaine de l'analyse des risques industriels ; elle permet de passer du qualitatif au probabiliste.

5. Inférence probabiliste et raisonnement

La probabilité d'inférence est le principal mécanisme à l'intérieur des réseaux bayésiens. Elle sert à calculer la probabilité d'un ensemble de variables en partant d'une information

partielle nommée évidence. Cette compétence peut s'avérer très importante dans la discipline de la sécurité industrielle : une décision doit toujours être prise dans un état d'incertitude et d'informations incomplètes.

Dans les réseaux bayésiens on dispose de deux types d'inférences principales : inférence prédictive (propagation directe) et inférence diagnostique (propagation inverse).

I. Inférence directe (Forward Propagation)

L'inférence directe est l'estimation des conséquences d'un certain événement sur la base de ses causes. Elle s'apparente alors à la diffusion des probabilités dans les directions des arcs du réseau.

Principe

On cherche à calculer P(Conséquence | Causes). En milieu industriel, c'est aussi une façon de calculer par exemple la probabilité d'un accident survenant à cause d'une erreur humaine ou bien l'influence d'une panne technique sur la sécurité d'un dispositif.

Application : Analyse "What-if"

La déduction directe est souvent utilisée pour effectuer du « qu'adviendrait-il si » où nous simulons divers cas : qu'arrive-t-il quand on rajoute de la fatigue ? Quel est l'impact d'une formation supplémentaire ? Telles analyses servent à déterminer si les mesures de prévention fonctionnent ou non.

II. Inférence inverse (Backward Propagation / Diagnostic)

On peut décrire l'inférence inverse comme une remontée des effets aux causes. Elle peut identifier des causes possibles pour un phénomène ou événement observé.

Principe

On cherche à calculer P(Cause | Effet). À proprement parler cette approche est juste un corollaire de Bayes.

Exemple HSE

Prenons le cas d'un accident constaté dans une usine. Par inférence inverse nous pouvons évaluer la probabilité de cette suite logique : une faute technique, une faute humaine ou

bien les deux ? Cette compétence s'avère importante dans l'analyse des causes fondamentales, les enquêtes post-incidentales et l'amélioration continue.

III. Inférence mixte et propagation des croyances

En pratique, les réseaux Bayésiens autorisent aussi, pour l'inférence, des formes plus élaborées qui combinent différents types d'évidence. La diffusion des croyances : On parle alors aussi de la diffusion des croyances on met à jour toutes les probabilités dans le réseau. Cette approche permet l'incorporation de multiples sources d'information en même temps, la mise à jour dynamique des probabilités, ainsi qu'une vue macroscopique du système.

IV. Algorithmes d'inférence

On peut réaliser l'inférence dans les réseaux bayésiens en utilisant plusieurs algorithmes possibles selon la taille et la complexité du réseau.

a) Inférence exacte

L'exacte inférence (méthode) permet le calcul des probabilités précises ; l'approximation n'est donc pas nécessaire. Techniques principales : Élimination des Variables (Variable Élimination), Propagation de Croyance (Belief Propagation). De telles méthodes sont bonnes à des tailles raisonnables de réseau, mais la complexité croît assez rapidement comme fonction du nombre de variables.

b) Inférence approximative

Des méthodes approches sont employées pour les réseaux denses. Dont certaines des plus utilisées : Méthodes de Monte Carlo et chaînes de Markov (MCMC). Ces méthodes se basent sur la simulation de cas aléatoires pour estimer les probabilités.

V. Intérêt de l'inférence pour la sécurité industrielle

Quels sont les avantages de l'inférence probabiliste pour un département HSE ? La prédiction des risques ; Identification des causes critiques ; Aide au décideur face à l'incertitude. Elle aide en particulier à hiérarchiser des actions de prévention, d'évaluer l'efficacité des corrections et d'améliorer la gestion des risques.

VI. Intégration avec le H-HAZOP

L'inférence probabiliste s'inscrit dans le H-HAZOP pour quantifier les déviations, faire la lumière sur les interactions humaine / technique et simuler des scénarios d'accidents. Il s'agit ici d'une nette progression, car nous passons d'une simple analyse qualitative à un outil quantifié de prise de décisions.

6. Analyse de la dynamique et de la résilience

I. Réseaux bayésiens dynamiques (DBN)

Le réseau bayésien classique est conçu pour la modélisation des systèmes statiques. Les systèmes industriels se trouvent intrinsèquement soumis à des dégradations au fil du temps, des interventions humaines ou des changements de conditionnement environnant.

Afin de prendre cette dimension temporelle en considération, les réseaux Bayésiennes dynamiques (réseau Bayésien Dynamique - RDB) furent développés. Ces modèles sont des extensions aux réseaux Bayésiens qui ajoutent une dimension temporelle : une tranche de temps est considérée comme un time slice. Chaque tranche représente l'état du système, à un instant précis. Les relations de temps passent dans les arcs qui relient les variables d'une tranche à une autre.

Structure d'un DBN

L'architecture d'un DBN s'appuie sur les 2 composantes suivantes : un modèle intra-tranche (relations à un instant donné) et un modèle inter-tranche (évolution dans le temps). Ça permet de modéliser des choses comme le vieillissement progressif d'un équipement, l'accumulation de fatigues pour des opérateurs ou l'évolution du niveau de risque.

Application en sécurité industrielle

Dans un contexte HSE ; les DBN (réseaux bayésiens dynamiques) aident à prévoir l'évolution du risque au cours du temps ; à modéliser l'effet cumulatif des facteurs humains et anticiper les situations « critiques ». À titre d'exemple, un modèle DBN permet ainsi la représentation suivante : Fatigue → Baisse De Vigilance → Erreur Humaine → Accident (avec l'évolution du temps).

II. Résilience et capacité d'adaptation

Le concept de résilience est devenu central à la sécurité industrielle moderne. Qu'est-ce qu'elle est ? Une tentative de définition de ce que signifie « résilient » lorsque nous parlons d'un système ? Ces dernières peuvent être modélisées à l'aide de réseaux bayésiens avec intégration de variables organisationnelles, mécanisme de récupération ainsi que boucle de rétroaction (DBN).

III. Mesures d'importance et criticité

Le but de l'analyse de réseau bayésien est d'identifier les éléments cruciaux d'un système. Parmi les indicateurs utilisés :

a) Mesure de Birnbaum

Elle détermine quelle est l'importance de ce qui affecte le taux de pannes.

b) Risk Reduction Worth (RRW)

C'est elle qui mesure l'effet de l'amélioration d'un composant sur le risque réduit total.

Application HSE

Telles analyses servent à identifier les facteurs humains essentiels, hiérarchiser les moyens de prévention et la répartition des ressources.

7. Applications en sécurité industrielle et HSE

I. Conversion des arbres de défaillance en réseaux bayésiens

L'Arbre de Défaillances (FTA), bien qu'étant très utilisé en Sécurité Industrielle est limitatif dans sa nature, son principal inconvénient résidant dans les trois points suivants : Indépendance, rigidité, et incertitude. On peut utiliser les réseaux bayésiens pour transformer les modèles ci-dessus en structures probabilistes plus flexibles.

Avantages

L'incorporation d'information sur les dépendances, le rassemblement des causes communes et l'application dynamique des probabilités sont quelques-uns des bénéfices clés de cette conversion.

II. Évaluation des barrières de sécurité

Les réseaux Bayésiens permettent de modéliser l'efficace des barrières de la sûreté : barrière technique (capteurs, alarme), barrière organisationnelle (procédure, formation) et barrière humaine (compétence, vigilance). Ils servent aussi à mesurer leur dégradation au fil du temps.

III. Réseaux bayésiens / Facteur humain / Lien avec H-HAZOP.

L'intégration de réseaux bayésien et de HAZOP (H-HAZOP) est un pas en avant dans l'analyse de risques. L'avantage de cette approche est qu'elle permet la modélisation des erreurs humaines décelées dans leur propre contexte, l'analyse des interactions facteurs humains/techniques, et l'évaluation quantitative.

Exemple conceptuel

Un maillage peut comprendre des facteurs tels que : stress, fatigue, formation, erreur humaine ou accident. L'avantage du réseau est qu'il aide à étudier l'impact du stress sur les erreurs ; le rôle de la formation dans la limitation des erreurs ; et les interactions entre les deux.

IV. Analyse de l'effet domino

Modélisation de la propagation de défaillance dans les systèmes compliqués à travers les réseaux bayésiens. On appelle ce phénomène « l'effet domino », qui fait référence à la propagation d'un incident premier vers les autres sous-systèmes.

Apports des RB

La principale contribution concerne la quantification de la propagation, les points de ruptures et une simulation de scénario possible.

8. Conclusion du chapitre 3

Les réseaux bayésiens sont un outil puissant de représentation et d'analyse des risques, appliquées aux systèmes industriels complexes. Une caractéristique importante de leur pouvoir de représentation est que c'est un substitut très pertinent pour la représentation de dépendance conditionnelle qui inclut également des inférences de probabilités.

Les sections mises au point dans ce chapitre ont rendu possible plusieurs grands apports :

• une modélisation flexible des systèmes sociotechniques

• l'intégration de facteurs humains à l'analyse probabiliste d'évènement

• une capacité d'inférence prédictive et diagnostique

• une appréciation de la dynamique des systèmes.

Ainsi intégrée aux méthodes HAZOP, la modélisation bayésienne surpasse les limitations des études HAZOP entièrement qualitatives dans leur approche de l'évaluation des risques et de leurs interdépendances.

En d'autres termes, dans cette optique, nous consacrerons le prochain chapitre a l'implémentation concrète de cette approche générale avec une étude de cas validant notre méthodologie.

CHAPITRE IV

Chapitre 4 Intégration de la méthode H-HAZOP avec les Réseaux Bayésiens

1. Introduction

Il y a eu une évolution significative dans l'estimation de risque sur des systèmes d'industrie compliqués. Cette évolution impliquait le passage de techniques qualitatives basées sur l'identification des dangers et à des méthodes plus quantitatives. Dans ce cadre, la méthode HAZOP est un outil beaucoup utilisé pour identifier les déviations du processus ainsi que ses causes et conséquences.

Néanmoins, pour toute son efficience à identifier les facteurs de risques, le HAZOP voire, en version étendue tenant compte du facteur humain (H-HAZOP), reste avec d'importantes limites. De fait, ce type de raisonnement se base en grande partie sur un regard qualitatif et statique de l'échec et n'est pas conçu pour évaluer la probabilité que quelque chose échoue où modéliser la diffusion du défaut.

L'interaction entre les constituants des systèmes industriels tels que les installations embarquées d'hydrogène ou les installations pétrochimiques est complexe et évolutive. En cas de défaillance d'un élément local dans un système on peut se retrouver avec des effets cascades affectant les multiples sous-systèmes du même système.

Une autre difficulté à la mesure quantitative du risque tient au défaut d'information historique, en particulier lorsqu'il s'agit d'un système émergent ou nouveau. Surtout comparé à la question ci-dessus, on constate au sujet de cette sorte d'application qu'il y a une limite aux approches par la modélisation probabiliste classique : Considération incertaine et évolution du temps du risque.

Dans le but de remédier à ces lacunes, des Réseaux Bayésiens (RBs) vont être présentés comme outils à la modélisation probabiliste et à la représentation d'une part des relations de dépendance entre les variables, et, d'autre part, de l'incertitude.

Avec des RB on peut réaliser un raisonnement bidirectionnel prédictif/diagnostique, ou quantifier les rapports des facteurs de risques parmi eux.

- les réseaux bayésiens flous (FBN) pour le traitement de l'incertitude d'information qualitative.

La fusion des deux approches mène à l'émergence des Réseaux Bayésiens Dynamiques Flous (FDBN) : ils offrent le moyen d'effectuer :

- compléter les données manquantes à partir de l'expertise ;
- modélisation de la progression temporelle du risque ;
- quantifier les relations d'incertitude entre facteurs.

Sous cet angle, intégrer le HAZOP et les FDBN représente une méthodologie hautement élaborée pour associer :

- l'identification qualitative des risques (HAZOP) ;
- la quantification probabiliste et dynamique (FDBN).

En somme cette manière d'intégrer le HAZOP repose avant tout sur la transformation des résultats HAZOP en une structure de réseaux bayésiens où les relations causales entre facteurs de risque sont modélisées comme chemin de transmission de risques d'influences possibles.

De cette manière le HAZOP fournit la structure causale au modèle tandis qu'au contraire le FDBN est capable de quantifier les relations ainsi que de simuler l'évolution des risques.

Le but du présent chapitre sera donc de présenter une méthodologie d'intégration H-HAZOP – réseaux bayésiens en détail. Il s'agit notamment de :

- analyser les limites du H-HAZOP ;
- justifier l'apport des réseaux bayésiens dynamiques flous ;
- établir les règles de transformation des résultats d'un HAZOP vers un modèle probabiliste.
- Décrire les étapes de la construction et de la validation du réseau.

Et c'est donc ce chapitre qui forme le socle méthodologique au travail d'une approche qui s'appliquera en un chapitre ultérieur sur une étude de cas industrielle.

2. Transformation des scénarios HAZOP en variables

La transformation des résultats issus d'une analyse H-HAZOP en un modèle typique d'un réseau bayésien constitue une phase cruciale d'une intégration méthodologique. Il admet

la description qualitative de la notion et permet le passage d'une description à une nature quantitative, qui décrit l'évolution du risque.

Cette étape repose sur une carte de la matrice HAZOP (Cause/écart/conséquence/etc.). Dans la sphère des réseaux bayésiens (des nœuds & relations causales).

I. Règles de correspondance (Mapping HAZOP → Réseau Bayésien)

En essence, le principe est de transformer les éléments d'un HAZOP en des variables d'un réseau bayésien basé sur leur rôle dans la chaine causale.

a) Causes → Nœuds parents (racines)

Les causes listées du HAZOP sont les causes de chaque déviation. Elles sont modélisées sous forme de nœuds parent ; elles n'ont généralement aucune entrée.

Exemples :

- erreur de l'opérateur ;
- défaillance d'un capteur ;
- mauvaise procédure ;
- fatigue ou stress.

Ces nœuds constituent les variables d'entrée du modèle.

b) Déviations → Nœuds intermédiaires

Les déviations correspondent aux écarts par rapport à l'intention de conception. Elles sont modélisées comme des nœuds intermédiaires, dépendant des causes.

Exemples :

- pression trop élevée ;
- température insuffisante ;
- débit nul ;
- mauvaise interprétation d'un signal.

Ces nœuds traduisent les états anormaux du système.

c) Conséquences → Nœuds enfants (feuilles)

Les conséquences représentent les événements finaux (accidents, pertes). Elles sont modélisées comme des nœuds enfants.

Exemples :

- explosion ;
- fuite toxique ;
- blessure ;
- arrêt de production.

Figure 1: Schéma conceptuel de transformation HAZOP → Réseau Bayésien

II. Définition des états des nœuds

Il faut associer chaque nœud du réseau bayésien avec un ensemble étiqueté des états discrets qui peut se produire dans les situations ?

a) États basés sur les mots-guides HAZOP

On peut utiliser l'état guide (dits mots-guide) du HAZOP tels quels afin de définir l'état d'une variable HAZOP**.**

Avec cette méthode on a de la consistance dans son analyse HAZOP ainsi que son modèle.

b) Cas des variables humaines

Les variables humaines nécessitent une modélisation spécifique. Deux approches principales peuvent être utilisées :

- Approche binaire : erreur / pas d'erreur.
- Approche Multi-Etats : Faible/Moyen/Elevé ; Normal/Dégradé/Critique.
- Niveau de performance : Bas/Standard/Supérieur.

c) Critères de définition des états

Les états doivent respecter plusieurs critères :

- pertinence opérationnelle ;
- simplicité (éviter trop d'états) ;

- cohérence avec les données disponibles ;
- capacité à être quantifiés.

III. Structuration hiérarchique du modèle

La structure du réseau s'appuie à l'arrangement des variables tel qu'il est trouvé au cours de le H−HAZOP analyse de la chaine causale.

a) Organisation en niveaux

On peut organiser le réseau en trois couches principales :

1. Niveau causes (racines) ;
2. Niveau déviations (intermédiaires) ;
3. Niveau conséquences (sorties).

b) Intégration des interactions complexes

À la différence du HAZOP classique, on peut introduire avec un...

- des dépendances multiples ;
- des relations croisées ;
- des effets combinés.

Par exemple : Fatigue → erreur de lecture ; Stress → mauvaise décision ; Erreur+défaillance → accident.

c) Représentation multi-facteurs

Le même évènement peut dépendre d'un ensemble de causes simultanées.

IV. Avantages de la transformation

Cette transformation permet :

- de structurer les connaissances issues du HAZOP ;
- de formaliser les relations causales ;
- de préparer la quantification probabiliste ;
- de faciliter l'analyse dynamique.

Et elle est importante comme un des moyens d'intégrer avec les Bayésiens Flous Dynamiques de Réseau.

3. Construction du réseau

Après avoir traduit les différents scénarios HAZOP en variables probabilistes, on passe à l'établissement du réseau bayésien, soit à construire ce que représente son graph (définir sa structure), relation cause/conséquence etc.

I. Approche par sous-réseaux

Pour les systèmes complexes industriels, la construction d'un réseau mondial peut être compliquée. Ainsi, une approche modulaire est utilisée.

a) Décomposition en sous-systèmes

Le système est décomposé en plusieurs réseaux correspondant à des fonctions ou à des unités opérationnelles :

– stockage ;

– les transports ;

– traitement ;

– intervention humaine.

Chaque réseau est construit indépendamment.

b) Combinaison de sous-réseaux

Ensuite, les sous-réseaux sont combinés pour construire un réseau mondial.

Exemple : Sous-réseau technique -> sous-réseau humain -> sous-réseau organisationnel -> sous-réseau opérationnel.

c) Avantages de l'approche modulaire

– amélioration de la gestion des systèmes complexes ;

– la réutilisabilité des modules ;

– adaptation facile à différents scénarios.

II. Prise en compte des facteurs humains dans le réseau

L'un des principaux objectifs de l'approche H-HAZOP-RB est la prise en compte explicite des facteurs humains.

a) Modélisation des variables humaines

Les variables humaines sont incluses comme nœuds dans le réseau : fatigue, stress, entraînement, expérience. Ces variables affectent directement les erreurs humaines.

b) Relations avec les variables techniques

Les facteurs de l'homme interagissent avec les variables techniques.

Exemples : Fatigué => Mauvaise lecture du capteur ; Sous pression => mauvais processus décisionnel ; Peu formé => Mauvaise manipulation**.**

III. Outils de modélisation

La construction du réseau bayésien peut être réalisée à l'aide de logiciels spécialisés :

- GeNIe;
- Netica;
- MATLAB (Bayesian Toolbox).

Ces outils permettent :

- de construire le DAG ;
- de définir les probabilités ;
- de réaliser des simulations.

4. Définition des probabilités

Définir les probabilités est l'étape cruciale pour passer d'une structure causale à un modèle quantitatif capable d'être utilisé par le réseau bayésien : il s'agit donc ici d'affecter des nombres. Dans le contexte HSE (Health Safety Environment), ce point d'étape est très difficile car il y a un manque de données historiques. Et aussi beaucoup d'enjeux qualitatifs. Pour surmonter ces limites, on adopte habituellement une approche qui combine le jugement d'experts, la logique floue et des méthodes d'agrégations telles que dans HAZOP-FDBN.

I. Collecte des données et expertise

a) Absence de données historiques

Dans de nombreux systèmes industriels (notamment innovants), les données statistiques sont insuffisantes ou inexistantes. Il devient alors nécessaire de recourir à l'expertise humaine pour estimer les probabilités.

b) Sélection des experts

Les critères de sélection incluent :

- niveau d'expérience ;
- domaine de spécialisation ;
- ancienneté dans le secteur ;
- connaissance du système étudié.

c) Pondération des experts

Tous les experts n'ont pas le même niveau de fiabilité. Une pondération peut être appliquée en fonction de leur expertise.

II. Intégration de la logique floue

La plupart du temps, les spécialistes formulent leurs jugements de manière verbale (par exemple, probable, improbable, haut, bas et ainsi de suite). La théorie de la logique floue offre la possibilité de quantifier ces termes.

a) Fonctions d'appartenance

Tout terme linguistiquement pertinent est associé à la fonction d'appartenance (généralement en forme triangulaire, voire trapézoïdale) afin de rendre possible le traitement de l'incertitude**.**

b) Fuzzy AHP (Analytic Hierarchy Process)

On utilise la méthode du AHP flou pour les facteurs d'importance. Il permet de :

- hiérarchiser les variables ;
- attribuer des poids aux critères ;
- réduire la subjectivité.

c) Méthode SAM (Similarity Aggregation Method)

Quand il y a plusieurs experts qui estiment différemment des choses, SAM permet ?

- d'agréger les opinions ;
- de réduire les divergences ;
- d'obtenir une valeur consensus.

Construction des Tables de Probabilités Conditionnelles (CPT)

Les Tables de Probabilités Conditionnelles (CPT) indiquent quelle est la probabilité d'un nœud selon les états de ses parents**.**

a) Principe général

Pour un nœud X dépendant de Y, on définit :

P(X \ Y)

Pour plusieurs parents :

P(X \ Y_1, Y_2, \, Y_n)

b) Méthodes de calcul

Les probabilités peuvent être obtenues par :

- estimation experte ;
- données historiques ;
- méthodes hybrides.

c) Complexité des CPT

Le nombre de combinaisons augmente rapidement avec le nombre de parents :

{Nombre de lignes} = $(i = 1)^n$ ({nombre d'états du parent} i)

Cela nécessite une simplification du modèle et une sélection rigoureuse des variables.

III. Validation des probabilités

Les probabilités définies doivent être validées afin de garantir la cohérence du modèle. Méthodes :

- vérification de cohérence (somme = 1) ;
- validation par experts ;
- analyse de sensibilité.

IV. Apports de l'approche FDBN

L'utilisation combinée des réseaux bayésiens dynamiques et de la logique floue permet de:

- gérer l'incertitude ;
- intégrer les données qualitatives ;
- modéliser l'évolution temporelle ;

- améliorer la précision du modèle.

5. Conclusion du chapitre 4

Intégrer la méthodologie H-HAZOP avec les réseaux bayésiens constitue un grand pas pour l'ingénierie de sûreté industrielle. Cette méthodologie est capable d'utiliser les forces de ces deux approches complémentaires.

Elle permet de :

- réaliser l'identification systématique des risques, tâche effectuée dans le cas de le H-HAZOP ;
- modéliser les systèmes de façon probabiliste et dynamique (réseaux bayésiens).

Les avantages de l'intégration sont donc ceux qui sortent du cadre des approches purement qualitatives traditionnelles :

- une quantification des risques ;
- une modélisation des interactions complexes ;
- l'introduction de l'incertitude ;
- l'analyse dynamique des systèmes.

L’apport des réseaux bayésiens dynamiques flous (FDBN) s’inscrit dans une extension logique permettant la combinaison de jugements d’humains ainsi que la représentation de variations temporelles aléatoires.

HAZOP transformation, construction du réseau, spéciation des probabilités, validation du système. Les différentes étapes de ce chapitre sont une manière assez complète et assez rigoureuse d’étudier les risques des systèmes complexes et sociotechniques.

Cette approche fournit un outil puissant pour :

- la prise de décision en sécurité industrielle ;
- la prévention des accidents ;
- l’amélioration des performances HSE.

Une telle méthodologie sera donc mise en application dans un chapitre suivant par l’analyse d’un procédé industriel particulier, pour montrer son intérêt en pratique.

CHAPITRE V

Chapitre 5 Application industrielle (Unité GPL – Raffinerie de Skikda)

1. Introduction

La recherche présentée ici se situe dans une logique d'application pratique de la démarche H-HAZOP Réseaux Bayésiens après avoir exposé les principales recherches théoriques qui ont conduit à son élaboration. En outre, au-delà de l'objectif pédagogique de montrer les mécanismes de fonctionnement de cette démarche, notre intention est d'apprécier la contribution du facteur humain dans la génération des accidents graves, grâce à une analyse probabiliste de ces derniers.

Le choix de notre site d'étude s'est orienté vers la raffinerie de Skikda, qui constitue l'un des plus importants complexes pétrochimiques d'Algérie. Avec une capacité de production de 15 millions de tonnes/an, ce complexe joue un rôle important dans le secteur énergétique algérien. Le caractère des sites industriels, par nature de processus (continue), de matières (inflammable), et des conditions d'exercice des tâches y étant exigées, est un facteur important pour étudier des systèmes de production en termes d'accidents majeurs.

Pour notre étude, nous avons choisi de nous concentrer sur une unité de traitements des GPL (Unité 30). L'importance du choix de l'unité GPL n'est pas seulement technique. Nous pensons également qu'il faut tenir compte du fait que le danger inhérent à ce type d'installation est reconnu et lié, notamment, à des problèmes de pression, de volatilité de la matière et de sensibilité aux erreurs humaines.

Cette démarche, par conséquent, peut être définie dans sa forme d'intervention pratique comme étant basée sur un binôme composé d'une analyse H-HAZOP et d'un modèle de réseau bayésien. Premièrement consiste à faire l'inventaire, dans une structure, des déviations des activités humaines suivant des conditions de production réelles. La seconde est la mise en forme de modèles causaux des risques avérés ainsi qu'une évaluation aléatoire d'événements critiques.

Ce type d'approche paraît particulièrement adapté aux établissements anciens ce qui est le cas des unités GPL mis en œuvre au cours des années 80 à travers lesquels des systèmes technologiques pourront être présentés à une variété d'opérations manuels occasionnellement hétérogène. En principe cette approche peut éviter quelques limitations d'un traitement tout simplement descriptif parce qu'elle comporte également un élément en faveur d'une prise de décision rationnelle.

Enfin, ce qui intéresse cette recherche appliquée n'est pas simplement d'identifier des dangers, mais bien de mettre en place des améliorations pratiques en prenant comme principe les ALARP (As Low As Reasonably Practicable).

2. Description détaillée du système (Unité 30)

I. Contexte de l'Unité GPL

L'unité GPL étudiée s'inscrit dans la chaîne de traitement des hydrocarbures de la raffinerie de Skikda. Elle reçoit principalement des flux issus de l'unité de distillation atmosphérique (Topping), où le pétrole brut est séparé en différentes fractions. Les gaz légers récupérés à ce stade sont ensuite dirigés vers l'unité GPL pour être traités, séparés et conditionnés sous forme de propane (C3) et de butane (C4).

II. Processus technique et équipements clés

La fonction de l'unité se base sur différents équipements nécessaires, certaines d'entre elles warrantant une analyse plus poussée par rapport à celle que nous faisons ici.

En effet, l'équipement coalesceur V-7 est important lors de la réduction de l'humidité contenu dans les flux gazeux. Cette étape est obligatoire pour éviter la formation d'hydrates ou la diminution de performances de ces équipements en aval. Après cette opération, on oriente les gaz vers les colonnes de séchage (C-4 A/B) avec utilisation de tamis moléculaires.

Le travail de ces colonnes s'effectue sur un système alternatif, soit une étape de séchage de l'ordre de 8 et 24 heures, puis une étape de régénération d'environ 7 heures. Ces

manipulations demandent l'intervention périodique des opérateurs, surtout lors des opérations de change de mode. L'accumulateur de charge GPL (V-1) est aussi un autre point important.

Il permet de stocker le produit sous pression jusqu'à la transmission au niveau des autres processus. Les opérations qui se font ici sont sujettes aux risques d'incidents majeurs tels qu'une surpression et une défaillance de confinement en raison des conditions d'opération ici.

III. Délimitation du nœud d'étude

Pour pouvoir établir une analyse méthodique, le périmètre doit être clairement défini. Le choix du nœud d'études inclut donc le tracé depuis l'entrée GPL et jusqu'à l'accumulateur V-1.

C'est en vertu du fait qu'il y a dans cet espace un assemblage d'opérations essentielles telles que : Le transfert des fluides, Le réglage des pressions, La séparation et aussi Le stockage. Une autre forme de coopération est la coopération constante entre le système automatisé et les opérations manuelles.

L'état normal d'opération se caractérise par une pression grossièrement de 60 psig et une température aux environs des 130 degrés Fahrenheits. Même si ces valeurs sont encadrées, les paramètres en question restent là où toute variation devient fort rapidement porteuse d'instabilité, en l'absence d'adaptation de système de régulation et/ou d'action humaine.

Il s'agit précisément pour ça que le présent nœud convient à l'analyse de la différente interaction des facteurs techniques et humains conduisant vers le fameux évènement craint.

3. Analyse H-HAZOP (Facteur Humain)

Dans ce cas, c'est parce qu'ici l'Analyse H-HAZOP joue le rôle central de l'étape et donne des moyens pour examiner de manière systématique les déviations dues à des activités

humaines d'un milieu industriel complexe. À la différence du HAZOP classique qui est centré surtout sur les paramètres physiques du procédé, notre approche se concentre directement sur les actions humaines (actions de l'opérateur), conditions d'exécution et causes de défaillances.

Pour le cas de l'unité GPL à l'étude, cette dimension semble être assez pertinente. Bien sûr, même si un certain nombre du procédé est très largement automatisé, encore, certaines phases sont sensibles à la manipulation humaine ; ces phases incluent les transferts de modes, les opérations de drainage et l'actionnement d'alarmes.

I. Décomposition des tâches critiques de l'opérateur

C'est à une phase préalable de repérage qu'on aboutit avant d'analyser les tâches critiques. Ceci permet de planifier l'étude ainsi que de localiser les zones dans lesquelles des erreurs humaines pourraient avoir un effet important sur la sécurité du système.

L'ensemble des opérations de celles que l'on voit dans l'unité GPL comprennent :

Tableau 1: activités manuelles critiques

Code	**Activité critique**
A1	Commutation des colonnes de séchage C-4 A/B (mode batch)
A2	Opération de régénération des lits de tamis moléculaires
A3	Vidange manuelle de l'eau séparée (coalesceur V-7)
A4	Ouverture/fermeture des by-pass (vanne bypass)
A5	Intervention sur pompes MP-51 A/B (cavitation)
A6	Lecture des instruments PT-1159, FIC-4, LIC-312
A7	Opération de purge (draining) vers le système OWS

Ces tâches présentent un certain degré de complexité, notamment en raison :

Tableau 2: facteurs de performance

Facteur	**Situation dans l'unité GPL**
Fatigue	Postes de travail en continu (régénération 7h)
Sous-charge	Surveillance passive prolongée des colonnes
Procédure inadéquate	Absence de check-list systématique
Formation	Opérateurs non formés à la régénération batch
Interface HMI	PT-1159 affiché en violet (non standard)
Communication	Coordination requise entre équipes
Stress	Situations d'urgence (alarmes multiples)

II. Application de la méthodologie H-HAZOP

L'analyse H-HAZOP repose sur l'utilisation de mots-guides adaptés aux activités humaines, permettant d'identifier les déviations possibles par rapport à une exécution correcte de la tâche. Parmi les mots-guides retenus dans cette étude :

Tableau 3: Matrice H-HAZOP pour l'unité GPL

Paramètre	**Mot-guide**	**Dérive humaine**	**Application à l'unité GPL**
Omission	Pas de	Tâche non effectuée	Oublier de fermer la vanne de vidange
Répétition	Plus de	Tâche effectuée trop souvent	Commuter les colonnes trop fréquemment

Addition	Aussi	Action supplémentaire non requise	Ouvrir une vanne supplémentaire par erreur
Temps	Trop tôt/tard	Mauvais séquencement	Commuter avant régénération complète
Ordre	Inversé	Séquence incorrecte	Isoler avant de rediriger le flux
Précision	Partiel	Action incomplète	Fermeture partielle de vanne
Qualité	Autre que	Mauvaise exécution	Lecture erronée des instruments

Afin de formaliser l'analyse, une feuille de travail H-HAZOP a été élaborée. Celle-ci reprend, pour chaque tâche, les déviations possibles, leurs causes, leurs conséquences et les mécanismes de récupération.

Tableau 4: la feuille H-HAZOP (Unité GPL)

Tâche	**Étape**	**Dérive humaine**	**Type d'erreur**	**Causes**	**Conséquences**	**Récupération**	**Mesures préventives**	**Mesures correctives**
A1	Commutation colonnes	Oubli de vérifier colonne régénérée	Omission	Fatigue, procédure non lue	Injection d'eau dans le procédé	Alarme FAL-4 détecte bas débit	Check-list pré-commutation, formation	Ajouter alarme humidité

A1	Redirection flux	Vanne ouverte trop tôt	Temps	Manque de coordination	Surpression accumulateur	PSV 851/852 s'ouvrent	Procédure séquencée, cadenassage	Interlock de séquence
A2	Régénération	Oubli de dépressuriser	Omission	Procédure non suivie	Fuite LPG sous pression	Détecteurs gaz AI-1151	Double vérification, formation	Interlock pression avant ouverture
A3	Vidange coalesceur	Vanne laissée ouverte	Omission	Distraction	Perte C3/C4, risque feu	Opérateur détecte niveau bas	Minuterie, alarme niveau bas LAH-3	Vanne auto avec minuterie
A4	By-pass	By-pass accidentellement ouvert	Addition	Erreur manipulation	Surcharge accumulateur	Alarmes haute pression	Plombage by-pass, étiquetage	Vanne à clé contrôlée
A5	Pompe MP-51	Non-vérification NPSH	Omission	Mauvaise lecture LIC-312	Cavitation pompe	Variation ampérage, vibrations	Procédure démarrage, check-list	Ajouter alarme bas niveau LAL
A6	Lecture PT-1159	Mauvaise interprétation	Précision	Couleur violette non standard	Fermeture PV-1164 inappropriée	Perte blowdown	Former à code couleur	Standardiser affichage DCS
A7	Purge OWS	Vanne ouverte trop longtemps	Temps	Surveillance insuffisante	Feu, explosion	Détecteurs gaz	Consigne purge limitée dans le temps	Ajouter détecteurs

Analyse critique des résultats

Avant tout chose, on peut se rendre compte que les fautes des hommes ne sont pas le fait seulement de fautes d'individus, mais plutôt un tas. Prenez par exemple les omissions : c'est lié à la fatigue, mais ça l'est également au fait que vous avez trop d'information.

Et ensuite, il y a quelques taches qui sont assez sensibles, par exemple des alarmes sur lesquelles on doit décider rapidement. Le rôle de la gestion du temps est crucial dans ces situations : lorsque l'on répond trop tard on exagère les conséquences.

De plus il est à souligner que des mécanismes de récupération sont installés dans la majorité des cas (valve de sécurité, alarme...). En effet, néanmoins, leur efficacité se situe également, du moins partiellement, dans la capacité de l'opérateur à les lire et agir de façon correcte.

4. Construction du Réseau Bayésien (RB)

Le but de la présente partie est de traduire les résultats découlant de l'Analyse H-HAZOP, sous forme d'un modèle probabiliste représentant les relations de causalité entre les différents facteurs identifiés. Le cas ici présenté se concentre sur le réseau bayésien bâti autour d'un évènement redouté central : L'implosion de l'accumulateur V-1, qui représente un scénario critique viable au regard des propriétés du système.

I. Identification des variables (nœuds du réseau)

À partir de la feuille H-HAZOP, plusieurs variables ont été sélectionnées et traduites en nœuds du réseau. Ces variables peuvent être regroupées en trois catégories principales :

a) Facteurs humains (nœuds parents)

- Erreur de l'opérateur (Oui / Non)
- Fatigue (Faible / Élevée)
- Niveau de formation (Adéquat / Insuffisant)
- Charge de travail (Normale / Élevée)

Ces variables ne sont pas directement observables dans tous les cas, mais elles influencent fortement la probabilité d'erreur.

b) Variables techniques et de procédé (nœuds intermédiaires)

- Mauvaise manipulation de vanne
- Non-réponse à une alarme
- Surpression dans V-1
- Défaillance des dispositifs de sécurité

Ces variables représentent les mécanismes intermédiaires reliant les causes humaines aux conséquences physiques.

c) Conséquence finale (nœud enfant)

- Explosion de l'accumulateur V-1 (Oui / Non)

II. Structure du réseau

De manière simplifiée, la structure peut être décrite comme suit :

- Les facteurs tels que la fatigue, la formation et le niveau d'activités augmentent les risques d'erreur opérateur.
- L'erreur opérateur détermine:
  - Le maniement inapproprié de valve ;
  - L'inaction en réponse à l'alarme ;
- Ces fautes entraînent la surpression du V-1
- La présence ou absence de dispositifs de sûreté affecte la dernière phase de la séquence
- L'interaction entre la surpression et la déficience des dispositifs de sûreté mène à l'explosion.

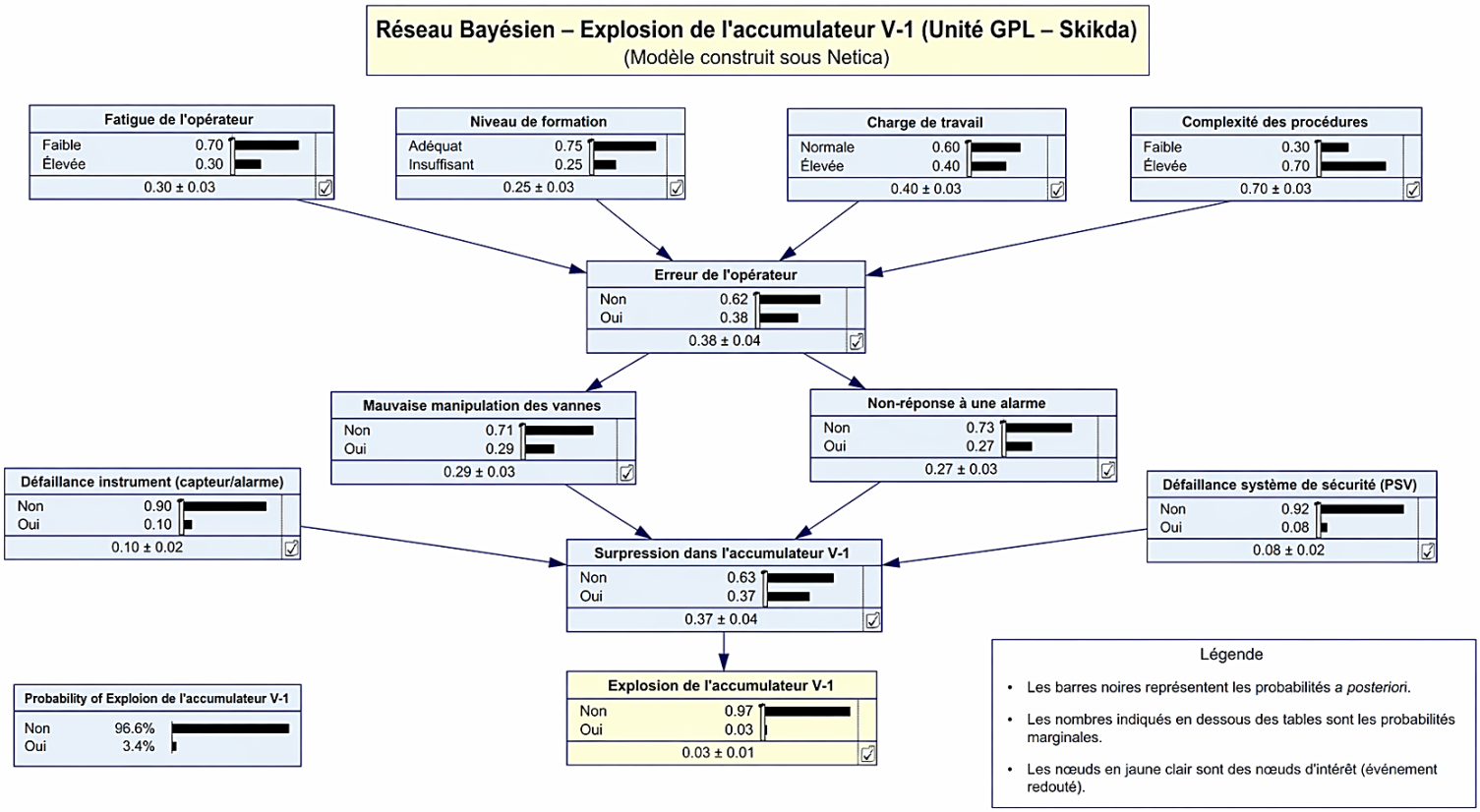

Figure 2: Structure du réseau bayésien

III. Attribution des probabilités

En l'absence de données industrielles publiques détaillées, les probabilités ont été estimées sur la base :

- De la littérature scientifique,
- Du retour d'expérience industriel.

a) Probabilités a priori

Tableau 5: probabilité des facteurs humains (nœuds parents)

Variable	**État**	**Probabilité**
Fatigue	Élevée	0.30

Formation insuffisante	Oui	0.25
Charge de travail élevée	Oui	0.40
Complexité des procédures	Élevée	0.7

b) Table de Probabilité Conditionnelle (CPT)

Tableau 6: Probabilité d'erreur opérateur

Fatigue	**Formation**	**Charge**	**Complexité**	**P(Erreur = Oui)**
Faible	Adéquate	Normale	Faible	0.05
Faible	Adéquate	Normale	Élevée	0.10
Faible	Adéquate	Élevée	Faible	0.12
Faible	Adéquate	Élevée	Élevée	0.18
Faible	Insuffisante	Normale	Faible	0.15
Faible	Insuffisante	Normale	Élevée	0.22
Faible	Insuffisante	Élevée	Faible	0.25
Faible	Insuffisante	Élevée	Élevée	0.35
Élevée	Adéquate	Normale	Faible	0.20
Élevée	Adéquate	Normale	Élevée	0.30
Élevée	Adéquate	Élevée	Faible	0.32
Élevée	Adéquate	Élevée	Élevée	0.45
Élevée	Insuffisante	Normale	Faible	0.35

Élevée	Insuffisante	Normale	Élevée	0.50
Élevée	Insuffisante	Élevée	Faible	0.55
Élevée	Insuffisante	Élevée	Élevée	0.70

c) CPT – Surpression dans V-1

Tableau 7: Probabilité de surpression

Manipulation	**Alarme**	**Instrument**	**PSV**	**P(Surpression)**
Non	Non	Non	Non	0.05
Non	Non	Non	Oui	0.15
Non	Non	Oui	Non	0.20
Non	Non	Oui	Oui	0.35
Non	Oui	Non	Non	0.25
Non	Oui	Non	Oui	0.40
Non	Oui	Oui	Non	0.50
Non	Oui	Oui	Oui	0.65
Oui	Non	Non	Non	0.30
Oui	Non	Non	Oui	0.45
Oui	Non	Oui	Non	0.55
Oui	Non	Oui	Oui	0.70
Oui	Oui	Non	Non	0.60

Oui	Oui	Non	Oui	0.75
Oui	Oui	Oui	Non	0.80
Oui	Oui	Oui	Oui	0.90

d) CPT – Explosion

Tableau 8: probabilité d'explosion

Surpression	**P(Explosion = Oui)**
Non	0.01
Oui	0.08

Analyse critique du modèle

Bien que les valeurs soient toujours approximatives, on peut néanmoins mettre en relief un certain nombre de tendances intéressantes.

Et d'un autre côté, ça semble que ce n'est pas le seul facteur de déclenchement, mais un amplificateur. En d'autres mots, il y a un effet combinatoire avec des défaillances techniques.

Par ailleurs, la probabilité d'un événement final est considérablement réduite par une bonne suite de barrières de sécurité : c'est pourquoi la maintenance des barrières est si importante.

Finalement, le modèle met les effets de synergie en évidence : différents facteurs de faible intensité peuvent conjointement conduire à une situation critique.

5. Simulation et Résultats

Avec la construction du modèle bayésien achevée et ses paramètres calibrés, une utilisation est ensuite envisageable pour mener des études probables. Dans ce processus, vous traitez l'évaluation quantitative d'un danger lié au sinistre attendu, l'examen de différentes configurations de panne et la reconnaissance des facteurs principaux.

L'avantage principal, le plus important de cette méthode est d'être capable d'entrer en compte sur une base de concurrence, plusieurs facteurs, humain, technologique ou organisationnel.

I. Inférence bayésienne

a) Probabilité en conditions nominales

Au départ, la modélisation est réalisée sous des conditions standards, c'est à dire, sans prendre en compte des problèmes importants et en prenant en compte les probabilités marginales de notre modèle.

La probabilité d'explosion est ensuite obtenue par propagation :

- $P(\text{Explosion}|\text{Surpression})=0,08$
- $P(\text{Explosion}|\text{Pas de surpression})=0,01$
- $P(\text{Surpression})\approx 0,37$

$$P(\text{Explosion})=P(\text{Surpression})\cdot 0,08+(1-P(\text{Surpression}))\cdot 0,01$$

$$P(\text{Explosion})\approx 0,37\times 0,08+0,63\times 0,01$$

$$P(\text{Explosion})\approx 0,0296+0,0063\approx 0,036\ (\approx 3,6\%)$$

Cette probabilité, bien qu'elle soit assez faible dans sa nature, demeure très importante dans le monde de l'industrie, étant donné les graves répercussions qui pourraient résulter d'une telle situation.

b) Scénario dégradé – Erreur humaine critique

Afin d'évaluer l'impact du facteur humain, un scénario est simulé en fixant :

- Mauvaise manipulation des vannes = Oui
- Non-réponse à une alarme = Oui
- Instrument = Non (fonctionnel)
- PSV = Non (fonctionnel)

D'après la CPT de surpression :

- P(Surpression|Manipulation=Oui, Alarme=Oui, Instr=Non, PSV=Non)=0,60

La probabilité d'explosion devient alors :

$P(\text{Explosion})=0,60\times0,08+0,40\times0,01$

$P(\text{Explosion})=0,048+0,004=0,052$ ($\approx5,2\%$)

Contrairement à une estimation intuitive souvent élevée, le modèle montre que :

- L'erreur humaine seule augmente le risque,
- Mais reste limitée par la présence des barrières techniques (PSV, instrumentation).

Cela souligne le rôle fondamental des systèmes de sécurité dans la maîtrise du risque.

c) Scénario critique – Défaillance combinée

Un scénario plus sévère est considéré en combinant :

- Mauvaise manipulation = Oui
- Non-réponse alarme = Oui
- Défaillance instrument = Oui
- Défaillance PSV = Oui

D'après la CPT :

- P(Surpression)=0,90

La probabilité d'explosion devient :

P(Explosion)=0,90×0,08+0,10×0,01

P(Explosion)=0,072+0,001=0,073 (≈7,3%)

Analyses de sensibilité pour la probabilité d'explosion

Au départ, en utilisant les CPT conservatrices, nous obtenons la probabilité marginale de l'explosion qui est égale à environ 3-4%. Cette estimation correspond au cadre proposé dans Netica mais en sous-estime le risque d'après les données existantes dans la littérature et les expériences des GPL.

Le problème réside dans le fait que la conditionnelle *P*(Explosion | Surpression = Oui) avait été choisie égale seulement à 8%, ce qui limitait mécaniquement la probabilité maximale d'occurrence de l'explosion, même dans les scénarios les plus critiques.

Pour vérifier les hypothèses de l'expert, il a été effectué une analyse de sensibilité, en prenant en considération cette probabilité d'accident :

P(Explosion | Surpression = Oui) = 0,40

Cette valeur traduit une dynamique accidentelle plus réaliste, dans laquelle une surpression critique dans un accumulateur GPL conduit fortement à une rupture suivie d'une inflammation. Les résultats sont les suivants :

Tableau 9: Analyse de sensibilité des probabilités d'explosion

Scénario	**Modèle de base**	**Modèle ajusté**
Fonctionnement normal	~3–4 %	~15 %

Scénario dégradé (erreur humaine : mauvaise manipulation + non-réponse à alarme)	~5 %	~26 %
Scénario critique (toutes barrières défaillantes : manipulation, alarme, instrument, PSV)	~7 %	~36 %

La comparaison montre comment le réseau bayésien est sensible au choix des hypothèses de l'expert concernant les CPTs. Le modèle de base est en théorie juste, tandis que le modèle d'ajustement correspond davantage à l'opération réel de ces GPL.

d) Discussion globale des résultats

Sensibilité au facteur humain

Du passage d'un état normal (≈ 3–4 %) vers un scénario induisant une faute humaine (≈ 5 %), nous pouvons constater :

- Les erreurs opératoires contribuent à l'augmentation du risque,
- Et pourtant leur effet est quand même tempéré si des systèmes de sécurités sont en place.

Rôle déterminant des barrières de sécurité

La mise en parallèle des deux scénarios révèle que :

- La faiblesse des systèmes techniques (instrumentation, PSV : soupapes de sûreté) majore grandement le risque de surpression.
- L'effet de ceci sur une explosion est encore restreint par sa probabilité conditionnelle.

Limites structurelles du modèle

Le modèle utilisé présente une limite importante. Il n'inclut explicitement pas la prise en compte de certaines des variables suivantes :

- La présence d'une source d'ignition,
- Les conditions de dispersion du GPL,
- Le confinement du nuage inflammable.

De ce fait, on constate que le modèle a tendance à sous-évaluer le véritable risque d'explosion, spécialement dans des scénarios extrêmes.

II. Simulation des conséquences (approche ALOHA)

Pour conclure l'analyse probabiliste, un scénario des conséquences a été considéré en faisant appel à la méthode ALOHA.

Au sujet d'une explosion ou d'une fuite importante du GPL, les différentes zones concernés par des effet (sans compter l'explosion) sont :

Zones de danger prévisionnelles :

- « Zone rouge » (effet mortel) = 100 m ≈ 300 m de rayon.
- Zone orange (effet blessant) : jusqu'à 500 mètres
- Au-delà de 500 mètres, une zone jaune avec effet mineur.

De même il faut préciser que ces données sont toujours approximatives.

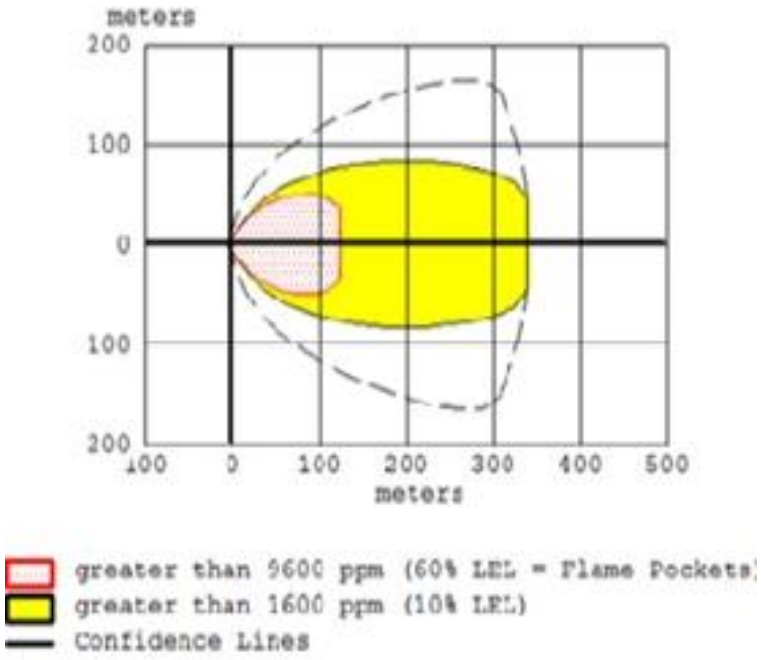

Figure 3: Zone de menace due à l'explosion dans l'accumulateur V-1

Impact sur l'environnement industriel

Et compte tenu de la disposition du site de Skikda :

- Il pourrait y avoir une incidence des U10 et de l'U11.
- Un effet de dominos est envisageable si cela escaladait.
- Certaines zones habitées à proximité pourraient être exposées

Notons ici que le risque n'est limité qu'à une seule unité mais englobe plutôt un système beaucoup plus étendu.

Figure 4: Image de la zone de menace due à l'explosion dans l'accumulateur V-1

6. Interprétation et Recommandations

Sortir ainsi de l'état ou l'on ne fait que « repérer les dangers » pour passer à un état global de lire le danger devient donc possible grâce à l'analyse combinatoire HAZOP + Réseau Bayésien. Les conclusions qui sont arrivées ne doivent pas nécessairement être considérées comme une vérité absolue ; juste un guide pour la prise de décisions.

I. Analyse de la criticité du facteur humain

Une chose importante qu'on apprend d'une telle étude est que nous devrions davantage regarder au facteur humain dans la formation de situations dangereuses. De fait, où la perspective traditionnelle voit l'erreur humaine comme une cause unique et immédiate, des résultats sont donnés qui indiquent que ce n'est pas le cas.

Pour commencer, l'erreur de l'opérateur n'apparait que très rarement de manières isole. De manière générale, elle a lieu dans un environnement contraint : grande charge de travail, fatigue, qualité variable de la formation et la complexité des interfaces hommes-machines.

Dans ce sens, on pourrait dire de l'erreur qu'elle est plus symptomatique d'une contrainte globale appliquée à un système plutôt qu'une simple faute individuelle.

L'analyse HAZOP-H de plus a révélé que quelques tâches critiques (e.g., gestion des alarmes, transition entre phases opératoire) sont sensibles par nature. Ce sont ces types de situation qui nécessitent des décisions rapides, très souvent dans une situation à forte pression. Ceci augmente les risques de déviation par rapport à la procédure.

Le réseau bayésien nous apprend que, chaque fois qu'on combine des erreurs humaines avec les défaillances techniques, alors il y a une augmentation significative d'occurrence. Dans divers scénarios, l'incidence du facteur humain sur les causes racines peuvent jouer un rôle très important, qui se traduit habituellement dans la littérature par au moins 50%, mais devrait toujours être considéré prudemment dans son contexte.

II. Stratégies de réduction des risques (Approche ALARP)

D'après les résultats obtenus, on peut proposer diverses voies de progrès possibles. Dans son approche globale, les mesures proposées sont situées toutes dans la direction d'un principe ALARP (As Low As Reasonably Practicable).

a) Mesures techniques

Il est possible d'envisager plusieurs actions afin de renforcer la fiabilité du système :

- Installation de capteurs de gaz additionnels dans les zones à risques, notamment autour de l'accumulateur V-1
- Amélioration de la redondance des systèmes clés (pressions, alarmes)
- Partial automation de certaines opérations critiques (par exemple, drainage)
- Instauration ou amélioration des systèmes de sprinklers autour des équipements clés

Ces mesures permettent de limiter la dépendance aux actions humaines lors des opérations critiques.

b) Mesures humaines et organisationnelles

Nous voyons également que l'action humaine est une partie majeure de la réduction des risques.

Parmi les recommandations possibles :

- Révision et rationalisation des procédures opérationnelles, spécialement pendant les périodes transitoires.
- Implémentation de check-lists (listes de vérification) pour des actions critiques.
- Perfectionnement des programmes de formations en particulier pour l'interprétation des alarmes et du procédé.
- Gestion de la charge de travail et sensibilisation à la fatigue.
- Améliorer l'ergonomie des interfaces en salle de contrôle (lisibilité, hiérarchisation des alarmes).

Ces mesures visent des moyens réduisant les chances qu'une personne fasse une erreur plutôt que changeant la personne elle-même.

c) Amélioration des barrières de sécurité

L'enquête scientifique mettait en évidence l'importance des barrières techniques dans la prévention des accidents.

Il paraît alors pertinent de :

- Implanter un programme de maintenance des soupapes de sécurité (PSV).
- Test régulier des systèmes d'alarme
- Mise en œuvre de SIF – Safety Instrumented Function : indicateurs de performance des barrières de sécurités.
- Mise en place de systèmes de surveillance pour une détection précoce de dérives.

7. Conclusion du chapitre 5

C'est par ce chapitre que l'on a pu donner l'exemple pratique de l'application de la méthode H-HAZOP combinée avec l'utilisation des réseaux bayésiens en application à un système industriel réel.

Analyse des résultats montre qu'il est impossible de séparer les facteurs qui contribuent aux risques du système étudié, parce que ces risques sont l'interaction de facteurs humains, techniques et organisationnels.

Cette approche donne la possibilité non seulement d'identifier les facteurs critiques, mais aussi de quantifier leurs probabilités, c'est-à-dire évaluer les déterminants. Par conséquent, il est possible d'utiliser ces méthodes dans le processus de prise de décision en matière de sécurité industrielle.

Il est important tout de même noter quelques limitations de l'étude en ce qui concerne l'évaluation des probabilités, parce que dans notre cas, nous n'avons pas eu les données réelles. Cependant, malgré ces limites, on peut utiliser notre méthodologie pour l'étude dans le futur.

À titre de conclusion, il faut dire que l'étude permet d'appliquer cette méthodologie dans d'autres situations.

Conclusion

Conclusion Générale

L’objectif principal de ce travail était d’explorer et de proposer une approche intégrée d’analyse des risques industriels, en combinant la méthode qualitative H-HAZOP et la modélisation probabiliste par réseaux bayésiens, avec une application à un système réel issu du contexte industriel algérien.

Le travail réalisé a révélé que les méthodes d'analyse de la sûreté des processus traditionnelles se concentrent uniquement sur l'élément purement technique, elles ne peuvent fondamentalement pas aborder de manière satisfaisante la complexité et le maillage des systèmes industriels.

L’un des principaux apports de la présente recherche est celui de mettre à disposition une méthode du genre H-HAZOP d’analyse et de recensement des scénarios de risques. Si on introduit la composante humaine dans l’analyse des situations dangereuses, alors elle met en évidence d’autres types de risques ; elle montre aussi qu’il ne s’agit pas de quelque chose d’anecdotique ; les erreurs humaines sont la conséquence du fonctionnement des systèmes sociaux à contraintes.

Il reste que l'essentielle nature qualitative de le H-HAZOP ne permet pas d'appréhender la complexité des interactions sous-jacentes au risque et d'établir la priorisation des mesures. Pour pallier cette limitation, on peut utiliser une approche probabiliste par la construction de réseaux bayésiens.

Le couplage de l'approche H-HAZOP et des réseaux bayésiens a permis l'étude détaillée de la dynamique du risque sur l'exemple de l'usine GPL de la raffinerie de Skikda. Au cours des simulations, la combinaison de différents modes a montré qu'à l'état normal, le risque d'explosion est assez faible. Cependant, en présence d'erreur humaine, d'autres modes de danger peuvent apparaître et conduire à des situations extrêmes.

C'est pourquoi cette étude s'attache à montrer l'étonnante complexité de la nature du risque ainsi que son évolution dans les sites industriels. Effectivement, l'Homme n'est pas seul à poser un danger : le risque émane de son interaction avec la Technologie et de ses Processus

de Gestion. De plus, cette étude souligne le rôle qu'occupent les barrières de sécurité techniques ainsi que les barrières de sécurité organisationnelles dans la prévention d'accidents.

Dans leur ensemble, un ensemble de mesures de diminution du risque ont été définies pour des systèmes de type GPL en utilisant l'approche ALARP. Une partie importante de la réduction du risque est donnée par une mise en œuvre régulière de formations, incluant notamment la fonction des systèmes d'alarme et en améliorant l'ergonomie des interfaces humaines-machine, etc.

La vérité c'est que, dans un sens particulier, l'estimation de probabilité repose sur les jugements de spécialistes et donc quelque subjectivité. De plus la précision du modèle ne put être estimée sans une analyse détaillée de statistique industrielle sur le site.

Ces limites ouvrent dans l'avenir plusieurs perspectives de développement, comme l'amélioration du modèle par intégration de données Industrielle ou analyse de systèmes dynamiques.

Bibliographie

Références

[1] J. Reason, *Human Error*. Cambridge: Cambridge University Press, 1990.

[2] J. Rasmussen, “Skills, Rules, and Knowledge; Signals, Signs, and Symbols, and Other Distinctions in Human Performance Models,” *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 13, no. 3, pp. 257–266, 1983.

[3] E. Hollnagel, *Cognitive Reliability and Error Analysis Method (CREAM)*. Oxford: Elsevier, 1998.

[4] A. D. Swain and H. E. Guttmann, *Handbook of Human Reliability Analysis with Emphasis on Nuclear Power Plant Applications*. Washington, DC: U.S. Nuclear Regulatory Commission, 1983.

[5] T. Kletz, *HAZOP and HAZAN: Identifying and Assessing Process Industry Hazards*, 4th ed. Rugby: IChemE, 1999.

[6] F. Crawley, M. Preston, and B. Tyler, *HAZOP: Guide to Best Practice*, 2nd ed. Rugby: IChemE, 2000.

[7] CCPS, *Guidelines for Preventing Human Error in Process Safety*. New York: AIChE, 2007.

[8] CCPS, *Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis*. New York: AIChE, 2000.

[9] F. P. Lees, *Lees’ Loss Prevention in the Process Industries*, 4th ed. Oxford: Elsevier, 2012.

[10] J. Pearl, *Probabilistic Reasoning in Intelligent Systems: Networks of Plausible Inference*. San Mateo: Morgan Kaufmann, 1988.

[11] F. V. Jensen, *Bayesian Networks and Decision Graphs*. New York: Springer, 2001.

[12] N. Khakzad, F. Khan, and P. Amyotte, "Safety Analysis of Process Systems Using Bayesian Networks," *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 96, no. 8, pp. 925–932, 2011.

[13] P. Weber, G. Medina-Oliva, C. Simon, and B. Iung, "Overview on Bayesian Networks Applications for Dependability, Risk Analysis and Maintenance Areas," *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 25, no. 4, pp. 671–682, 2012.

[14] INERIS, *Méthodes d'analyse des risques appliquées aux installations industrielles*. France, 2010.

[15] Sonatrach, *Présentation de la raffinerie de Skikda et de ses unités de production*. Alger, Algérie, 2020.

[16] A. Casal, *Evaluation of the Effects and Consequences of Major Accidents in Industrial Plants*. Amsterdam: Elsevier, 2008.

[17] U.S. Environmental Protection Agency (EPA), *ALOHA (Areal Locations of Hazardous Atmospheres) User's Manual*. Washington, DC, 2016.

[18] NOAA & EPA, *ALOHA Software (Version 5.4.7): Technical Documentation*. United States, 2016.

[19] CCPS, *Guidelines for Vapor Cloud Explosion, Pressure Vessel Burst, BLEVE and Flash Fire Hazards*. New York: AIChE, 2010.

[20] TNO, *Methods for the Calculation of Physical Effects (Yellow Book)*. The Hague: TNO, 2005.

[21] Lees, F.P., *Loss Prevention in the Process Industries*, 4th ed. Oxford: Elsevier, 2012.

[22] Khan, F. and Abbasi, S.A., "Models for the Estimation of BLEVE and Fireball Effects," *Process Safety Progress*, vol. 17, no. 4, pp. 228–236, 1998.

[23] Center for Chemical Process Safety (CCPS), *Guidelines for Consequence Analysis of Chemical Releases*. New York: AIChE, 1999.