
DÉDICACES

À la mémoire de ma chère tante Aziza

À mes chers parents

À mon frère Lamine et ma sœur Amel

À tous mes proches

À mes amis

Je dédie ce modeste travail

A. Feriel

REMERCIEMENTS

Remercier, c'est le plaisir de se souvenir de tous ceux qui, par leurs encouragements, leur disponibilité et leur compétence, ont su créer une ambiance de travail qui m'a permis de finaliser ce mémoire destiné à l'obtention du mémoire de Master.

En premier lieu, je tiens à remercier très vivement mes encadreurs, Monsieur A. BENMOKHTAR, Maître - Assistant à l'Ecole Nationale Polytechnique, et Monsieur M. OUADJAOUT Enseignant Chercheur à l'ENP, Chef de Département et Directeur du Cycle Préparatoire-ENP, pour leur disponibilité constante, leur suivi et leurs conseils si utiles, qui ont contribué à l'exceptionnel encadrement dont j'ai eu l'occasion de bénéficier. Leur patience, leur réactivité m'ont permis de mener à terme ce travail

Je tiens aussi à adresser mes remerciements à Monsieur M.BELAID, Manager HSE à Hamoud Boualem, pour avoir partagé son temps et son expertise, et pour m'avoir accompagné tout au long du déroulement de mon projet.

À Madame M.KEMMOUCHE, Responsable de Formation, au sein de l'Entreprise Hamoud Boualem, pour m'avoir donné la chance d'effectuer mon projet au sein de cette entreprise, et m'avoir fourni toutes les informations nécessaires.

À Madame D.HARIK, Professeur à l'ENP, qui me fait l'honneur de présider le jury.

À Messieurs F.LEGUEBEDJ et B.TOUAHER, Enseignants-Chercheurs à l'ENP en tant qu'examineurs pour l'effort fourni en jugeant mon travail.

Je tiens aussi à exprimer ma gratitude à Madame S.ZEBOUDJ, Responsable de la Filière QHSE-GRI, Professeur au sein de l'ENP, en lui reconnaissant la bonne gestion et d'être à l'écoute des élèves-ingénieurs, et de n'avoir ménagé aucun effort pour la bonne marche de cette filière, ainsi qu'à toute l'équipe pédagogique qui m'a accompagnée tout le long de ma formation.

Enfin, mes remerciements vont à tous ceux et à toutes celles qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

ملخص

في إطار مشروع نهاية دراسة الماجستير قمنا بتطبيق طريقة تحليل الخطر (ربطة القوس) على المرجل البخاري المتواجد على مستوى مؤسسة حمود بوعلام بداية، قدمنا مبادئ الموضوع ثم طبقنا هذه الدراسة على المرجل البخاري بالإعتماد على النتائج المتحصل عليها في مشروع نهاية الدراسة. في النهاية، إقترحنا بعض الحواجز الأمنية

الكلمات المفتاحية

تحليل الخطر، ربطة القوس، المرجل البخاري، الحواجز الأمنية

Abstract

As part of the Master of memory, main work is to develop the Bow-Tie risk analysis method.

First, the basic principles of the method are introduced. Then we developed a case study on the steam boiler of the Company Hamoud Boualem, building scenarios from my final memory of study on this equipment.

Our work is concluded by giving recommendations to improve the barriers of prevention and protection in place.

Key words :

Risk analysis, Bow-tie method, security barriers, steam boiler.

Résumé

Dans le cadre du mémoire du Master, le travail consiste essentiellement à développer la méthode d'analyse de risque Nœud Papillon.

En premier lieu, les principes de base de la méthode sont introduits. Ensuite, nous avons élaboré une étude de cas sur la chaudière à vapeur de l'Entreprise Hamoud Boualem, en s'inspirant des scénarios issus de mon travail de mémoire de fin d'étude sur cet équipement.

Notre travail se conclue en donnant des recommandations afin d'améliorer les barrières de prévention et de protection mises en place.

Mots clés :

Analyse des risques, méthode du nœud papillon, barrières de sécurité, chaudière à vapeur.

Table des matières

Liste des figures

Liste des sigles et abréviations

INTRODUCTION	9
1 Concepts généraux de sécurité et présentation de la méthode du Nœud Papillon	10
1.1 Notions de sécurité	10
1.1.1 Notion de danger et de dommage	10
1.1.2 Notion de risque	10
1.1.3 Les barrières de sécurité	12
1.1.3.1 Barrières ou mesures de prévention	12
1.1.3.2 Barrières ou mesures de protection	12
1.2 L'Analyse des Risques	12
1.3 La méthode du nœud papillon	15
1.3.1 Origine de la méthode	15
1.3.2 Objectif de la méthode	15
1.3.3 Utilisation de la méthode du nœud papillon	15
1.3.4 Principe de la méthode	15
1.3.5 Avantages et limites de la méthode	17
2 Application de la méthode du nœud papillon	18
2.1 Présentation de la chaudière à vapeur de l'usine Hamoud Boualem	18
2.1.1 Le système : chaudières à vapeur	18
2.2 Événement redouté central : Diminution du niveau d'eau dans la chaudière	20
2.2.1 Arbre de défaillance	20
2.2.2 Arbre des événements	21
2.2.3 Nœud papillon	22
2.3 Événement redouté central : Présence de combustible imbrûlé dans le foyer de la chaudière	23
2.3.1 Arbre de défaillance	23
2.3.2 Arbre des événements	24
2.3.3 Nœud papillon	25
2.4 Les barrières de sécurité existantes au sein de l'usine HB pour la maîtrise de ces scénarios	26
2.4.1 Dispositifs de sécurité de la chaudière à vapeur	26
2.4.2 Barrières de prévention existantes	26
2.4.2.1 Dispositifs de sécurité du brûleur	29
2.4.2.2 Barrières de protection existantes	31
2.5 Recommandations	32

2.5.1	Barrières de prévention	32
2.5.2	Barrières de protection	32
	Conclusion	34
	Bibliographie	35

Table des figures

1.1	Barrières de sécurité de prévention et de protection	12
1.2	Représentation des scénarios d'accidents selon la méthode du nœud papillon . .	17
2.1	Principes constructifs d'une chaudière à vapeur	19
2.2	La chaudière a vapeur de Hamoud Boualem[Source exclusive]	19
2.3	Arbre de défaillance	20
2.4	Arbre des événements	21
2.5	Nœud papillon	22
2.6	Nœud papillon muni de barrières de sécurité	23
2.7	Arbre de défaillance	23
2.8	Arbre des événements	24
2.9	Nœud papillon	25
2.10	Nœud papillon muni de barrières de sécurité	25
2.11	Soupapes de la chaudière à vapeur[Source exclusive]	26
2.12	Vanne de sureté de la chaudière à vapeur[Source exclusive]	27
2.13	Vannes de décantation et de désembuage[Source exclusive]	27
2.14	Clapet anti-retour de la chaudière[Source exclusive]	28
2.15	Pressostats de la chaudière[Source exclusive]	28
2.16	Sondes de niveau d'eau[Source exclusive]	29

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

AR	Analyse des Risques
AMDEC	Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets et Criticité
BTS	Barrière Technique de Sécurité
EB	Événement de Base
EC	Événement Courant
EIn	Événement Indésirable
EM	Effets Majeurs
ER	Événement Redouté
ERS	Évènement Redouté Secondaire
HAZOP	HAZard OPerability
HB	Hamoud Boualem
IPS	Important Pour la Sécurité
Ph D	Phénomène Dangereux

INTRODUCTION

Certaines installations industrielles présentent, de par leurs activités, de nombreux dangers et dans le but de prévenir la survenue d'accidents majeurs, les industriels réalisent des analyses de risques.

Le retour d'expérience permet de mettre en évidence que les accidents industriels majeurs sont généralement la conséquence d'un enchaînement d'événements indésirables combiné à des défaillances de barrières de sécurité.

Pour analyser de tels accidents, il est nécessaire de disposer de méthodes d'analyse suffisamment fines et détaillées pour identifier l'ensemble des séquences accidentelles sans en écarter aucune a priori. Le noeud papillon permet de répondre à ce besoin en fournissant une arborescence détaillée capable d'explicitier le déroulement chronologique d'un accident.

Cette méthode résulte de la combinaison d'un arbre de défaillances et d'un arbre d'événements, centré sur un même événement redouté.

Dans le travail qui va suivre, nous allons appliquer cette méthode sur des événements redoutés issus du projet de fin d'étude.

Le présent rapport comporte deux chapitres qui sont organisés comme suit :

Chapitre 1 : Ce chapitre rassemble quelques concepts ayant une relation avec le sujet étudié à savoir les concepts généraux de sécurité et enfin la présentation de la méthode utilisée : le noeud papillon.

Chapitre 2 : Ce chapitre illustre les différents noeuds papillons obtenus ainsi que les barrières de préventions et de protections présentes dans l'Entreprise Hamoud Boualem.

Des recommandations concernant l'amélioration de ces barrières de sécurité terminent ce chapitre.

Chapitre 1

Concepts généraux de sécurité et présentation de la méthode du Nœud Papillon

Ce chapitre a pour but d'éclaircir des termes importants dans la littérature à savoir , la notion de danger et la notion de risque.

Nous allons également définir les éléments importants de notre travail à savoir l'Analyse des Risques (AR) et présenter la méthode du Nœud papillon.

1.1 Notions de sécurité

1.1.1 Notion de danger et de dommage

La norme OHSAS 18001 définit le danger comme :

-Toute source, situation, ou acte ayant un potentiel de nuisance en termes de préjudice personnel ou d'atteinte à la santé, ou une combinaison de ces éléments.

1.1.2 Notion de risque

La définition du risque suivant la norme internationale ISO/CEI 73 est : « la combinaison de la probabilité d'un événement et de ses conséquences », « ou la combinaison de la probabilité d'un dommage et de sa gravité »[1].

- Risque majeur

Toute menace probable pour l'Homme et son environnement pouvant survenir du fait d'aléas naturels exceptionnels et/ou du fait d'activités humaines (JORADP n° 04-20)[2].

-Prévention des risques majeurs

La définition et la mise en œuvre de procédures et de règles visant à limiter la vulnérabilité des Hommes et des biens aux aléas naturels et technologiques (JORADP n° 04-20)[2].

- Accident majeur

Un événement tel qu'une émission, un incendie ou une explosion d'importance majeure résultant de développements incontrôlés survenus au cours de l'exploitation, entraînant pour

la santé humaine ou pour l'environnement, à l'intérieur ou à l'extérieur de l'établissement, un danger grave, immédiat ou différé, et faisant intervenir une ou plusieurs substances dangereuses [3].

-Scénarios d'accidents majeurs

L'INERIS à travers ces différentes publications définit le scénario d'accidents majeurs comme suit :

Scénarios d'accidents majeurs : Séquence d'évènements qui, s'ils ne sont pas maîtrisés, s'enchaînent ou se combinent jusqu'à l'apparition de dommages majeurs au niveau des cibles de l'environnement [3].

Le scénario d'accident majeur peut être défini comme l'enchaînement d'événements indésirables (EI), aboutissant à un événement redouté central (ERC) qui conduit à un ou des événements majeurs (EM) [4].

-Événement de base(EB)

Événement dont la réalisation, seule ou combinée, est susceptible d'aboutir à la matérialisation d'un événement intermédiaire (EI).

- Un Événement Courant (EC)

Peut se définir comme une défaillance, panne d'équipement, dérive de paramètre prévisible et pris en compte dans le fonctionnement normal de l'installation.

- Un Évènement Indésirable (EI)

Représente un événement ne devant pas se produire ou avec une probabilité moins élevée. Cela peut être une agression, une défaillance, panne d'équipement, dérive de paramètre.

-Événement intermédiaire (EI)

Événement dont la réalisation, seule ou combinée, est susceptible d'aboutir à la matérialisation de l'événement redouté (ER).

- Un Évènement Redouté (ER)

Est un événement qui entraîne la perte d'une ou des fonction(s) essentielle(s) d'un système et cause des dommages importants au dit système ou à son environnement en ne présentant toutefois qu'un risque négligeable de mort ou de blessure. La perte de confinement de produit, la perte d'intégrité de l'installation ou la rupture d'équipement en sont des exemples.

-Événement redouté secondaire(ERS)

Est la conséquence directe de l'événement redouté.

- Un Évènement Majeur (EM)

Est un événement critique aux conséquences finales lourdes

-Phénomène dangereux (Ph D)

Phénomène physique pouvant engendrer des dommages majeurs.

-Effets majeurs (EM)

Dommages occasionnés au niveau des éléments vulnérables (personnes, environnement ou biens)par les effets d'un phénomène dangereux.

1.1.3 Les barrières de sécurité

Nous distinguons deux catégories de barrières de sécurité : Barrières de prévention et barrières de protection.[5] La figure ci-dessous illustre la position de ces barrières par rapport à l'événement redouté central

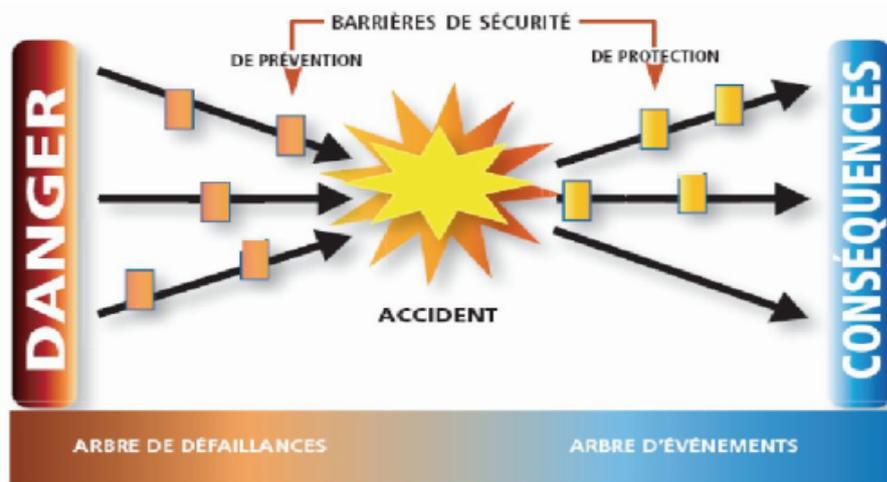


FIGURE 1.1 – Barrières de sécurité de prévention et de protection

1.1.3.1 Barrières ou mesures de prévention

Barrières ou mesures visant à prévenir la perte de confinement ou d'intégrité physique.

1.1.3.2 Barrières ou mesures de protection

Barrières ou mesures visant à limiter les conséquences de la perte de confinement ou d'intégrité physique.

1.2 L'Analyse des Risques

L'analyse des risques consiste à examiner les dérives possibles pouvant mettre le système (procédé de fabrication, stockage, transfert de produits...) hors de son domaine de fonctionnement sûr. Elle permet d'une part d'identifier les dangers associés à l'installation étudiée et d'autre part de recenser les barrières de sécurité existantes ou pouvant être envisagées. Cette analyse de risques peut se réaliser de façon volontaire, ou par nécessité dans un contexte réglementaire. Elle s'appuie principalement sur :

- l'analyse des accidents (et "presqu'accidents") survenus sur l'installation étudiée, ou sur des installations similaires, via la banque de données accidentologiques ARIA,
- l'étude des agressions externes susceptibles de porter atteinte aux installations considérées,

- l'analyse des défaillances d'origine interne via l'utilisation d'outils d'analyses (méthodologie AMDEC, voir encadré plus loin).

Logiquement, la méthodologie d'analyse des risques comprend trois grandes phases :

1. Identification des dangers,
2. Détermination des scénarii, des risques,
3. Mise en place des barrières de prévention et de protection.

La partie suivante présente une méthode, décomposée en 9 étapes.

Etape 1 : élaborer le diagramme de fabrication dans sa totalité, en y intégrant l'ensemble des structures (procédés, stockage, utilitaires, traitement des effluents liquides, gazeux, produits chimiques, rejets solides et fluides énergétiques (vapeur, eau, air ...)) ;

Etape 2 : identifier les principales sources de dangers possibles. Il convient ici de rappeler les dangers des produits, procédés, équipements, environnement, etc.

Etape 3 : réduire les risques en étudiant toutes les actions préventives possibles. Il convient de lister les mesures compensatoires ou barrières de prévention et de protection mises en place à chaque source de danger identifiée et pour chaque installation étudiée. Ces mesures concernent les dispositions déjà prises aux stades de la conception, de la construction et de l'exploitation de l'installation. Les mesures prises au stade de l'exploitation sont de deux types :

- mesures d'ordre technique ou technologique,
- mesures d'organisation de la prévention.

Etape 4 : sélectionner les systèmes critiques (Importants Pour la Sécurité - IPS). Il convient de se référer à l'historique des accidents (et "presqu'accidents") qui ont affecté des installations similaires, afin de faciliter le choix des scénarios de référence.

Etape 5 : bâtir les scénarios plausibles pour mettre sous contrôle les dangers significatifs. Il s'agit d'établir un arbre de conséquences possibles (événements redoutés à droite du nœud papillon, l'arbre des causes se situant à gauche à partir des sources de dangers sélectionnées. Les scénarios d'accidents sont constitués d'une succession d'évènements qui s'enchaînent, en général, selon le modèle suivant :

- rupture accidentelle ou défaillance,
- rejet ou réaction d'un produit donné,
- explosion et/ou incendie et/ou dispersion dans l'environnement.

Etape 6 : quantifier les effets redoutés des scénarios plausibles à l'aide d'un modèle de simulation (si nécessaire).

Etape 7 : estimer les niveaux de risque. Le niveau de risque est la combinaison d'un niveau de gravité (NG) et d'un niveau de probabilité (NP).

Etape 8 : évaluer l'acceptabilité du risque. Le niveau de risque est caractérisé par le couple (NG/NP), dans lequel on attache plus d'importance à la gravité. On associe à ce couple une matrice de criticité, avec en abscisse le niveau de gravité, et en ordonnée le niveau de probabilité. Elle permet à l'exploitant de :

- définir un domaine de risques acceptables et un domaine de risques inacceptables,
- décider s'il doit définir des moyens complémentaires de prévention (afin de baisser NP) et/ou de protection (afin de baisser NG), pour réduire le niveau de risque du scénario considéré.

Etape 9 : reprendre, si nécessaire, l'analyse aux étapes 2 ou 3 pour définir des moyens complémentaires. Ces travaux doivent être inscrits dans des registres ; une synthèse peut être réalisée. Le système d'amélioration continue peut alors se mettre en place. Au niveau d'une réunion (Revue de Direction), il s'agira de mettre en place sa politique et ses objectifs à partir des informations recueillies suivantes :

- synthèse réglementaire,
- liste des non-conformités,
- retours d'expérience,
- objectifs généraux de l'entreprise.

Les objectifs de l'entreprise avec des cibles à atteindre seront définis. Ces objectifs seront établis dans le cadre d'un programme de réalisation (en précisant le responsable, les moyens mis à sa disposition, les délais de réalisation). Comme vu auparavant, l'analyse des risques permet ainsi d'identifier les dangers (événements redoutés) et de déterminer leurs causes ainsi que leurs conséquences. Ceci permettra de mettre en place les barrières de prévention et de protection.[6]

1.3 La méthode du nœud papillon

1.3.1 Origine de la méthode

La méthode dans sa forme actuelle a été développée par Shell suite à l'accident survenu sur la plate-forme pétrolière Piper Alpha en 1988. Cette méthode a par la suite été démocratisée et promue du fait de son application à « grande échelle » dans le cadre des analyses de risques quantifiées (QRA) initiées aux Pays-Bas et dans les pays anglo-saxons.[7]

1.3.2 Objectif de la méthode

L'objectif est de maîtriser l'approche d'analyse des risques avec la méthode Nœud Papillon qui combine un arbre de défaillance à un arbre d'événements autour d'un événement redouté central, et permet de visualiser concrètement les scénarios d'accidents. Cette démarche va notamment mettre en avant les combinaisons séquentielles d'événements en chaîne et ainsi permettre de vérifier les barrières de prévention et de protection en place.

1.3.3 Utilisation de la méthode du nœud papillon

L'utilisation de la méthode du nœud papillon, courante dans les études de sécurité nucléaire, tend aujourd'hui à se démocratiser et son application au secteur de l'industrie est de plus en plus répandue.

1.3.4 Principe de la méthode

La méthode, dite du « nœud papillon », a pour principe de réunir un arbre de défaillances et un arbre d'événements, centrés sur un même événement redouté.

- La partie amont de l'événement redouté est constituée par un arbre de défaillances qui permet une analyse des combinaisons de causes, et la mise en évidence de l'effet des mesures de prévention sur le déroulement des séquences accidentelles aboutissant à la réalisation de l'événement redouté.
- La partie aval est, quant à elle, constituée par un arbre d'événements et permet de déterminer la nature et l'ampleur des conséquences, en fonction de la disponibilité des mesures de protection. Le synoptique, présenté en figure 1, schématise une analyse par nœud papillon.
- En fonction de la nature de l'événement redouté, les événements de base peuvent être dits « indésirables ». Citons, par exemple, un choc mécanique sur une canalisation pouvant aboutir à l'événement redouté : « brèche sur canalisation », ou bien la combinaison entre un événement courant et une défaillance, tel que le montage d'un bras de dépotage et l'absence de contrôle de bonne étanchéité pouvant aboutir à l'événement redouté « fuite sur bras de dépotage », en cas de montage défectueux.
- La méthode du nœud papillon est habituellement réservée pour l'analyse d'événements dont les combinaisons de causes sont complexes à identifier, et/ou lorsque des barrières de protection sont prévues pour limiter les conséquences de l'événement redouté.
- Le point central du nœud papillon, constitué par l'événement redouté, désigne généralement une perte de confinement. En fonction de l'utilisation du nœud papillon, il est possible que ces nœuds soient plus ou moins complexes (nombre de branches plus ou moins important).

La complexité d'un nœud papillon tient en effet :

- o Au niveau de développement de l'arbre de défaillances ;
- o A la mise en évidence, explicite ou non, de la défaillance des barrières de prévention dans l'arbre de défaillances ;
- o A la mise en évidence, explicite ou non, de la défaillance des barrières de détection/protection dans l'arbre d'événements.

Ainsi, deux utilisations du nœud papillon sont à distinguer :

- o L'analyse qualitative des risques (présentation symbolique de l'effet des barrières par une barre verticale) ;
- o L'analyse quantitative des risques (présentation explicite de la défaillance des barrières).

- Lorsque le nœud papillon est réalisé uniquement dans le but de formaliser une démarche d'analyse des risques, les barrières de prévention et de protection sont le plus souvent représentées sous la forme de barres verticales pour symboliser le fait qu'elles s'opposent au développement d'un chemin critique aboutissant à un accident. De ce fait, dans cette représentation, chaque chemin, conduisant d'une défaillance d'origine (événements de base de l'arbre de défaillances) jusqu'à l'apparition de dommages au niveau des cibles, désigne un scénario d'accident particulier pour un même événement redouté. Le nœud papillon permet alors de juger de la bonne maîtrise, ou non, des risques, en explicitant clairement le rôle de chacune des barrières de sécurité sur le déroulement d'un accident.

- Lorsque le nœud papillon est élaboré dans l'objectif de quantifier, d'une part, la probabilité d'occurrence de l'événement redouté et, d'autre part, les probabilités des conséquences, cet outil peut s'avérer relativement lourd à mettre en place et son utilisation ne doit être réservée qu'à des événements jugés particulièrement critiques et pour lesquels une analyse détaillée du risque est indispensable. En d'autres termes, il s'agit d'un outil d'analyse des risques dont la mise en œuvre peut être particulièrement coûteuse en temps.

Habituellement, les événements redoutés faisant l'objet de formalisation à l'aide de la méthode du nœud papillon, sont présélectionnés lors d'une étape d'analyse préliminaire qui permet de hiérarchiser les risques[7].

La figure (1.2) nous donne un schéma descriptif du nœud papillon utilisé par l'INERIS [8].

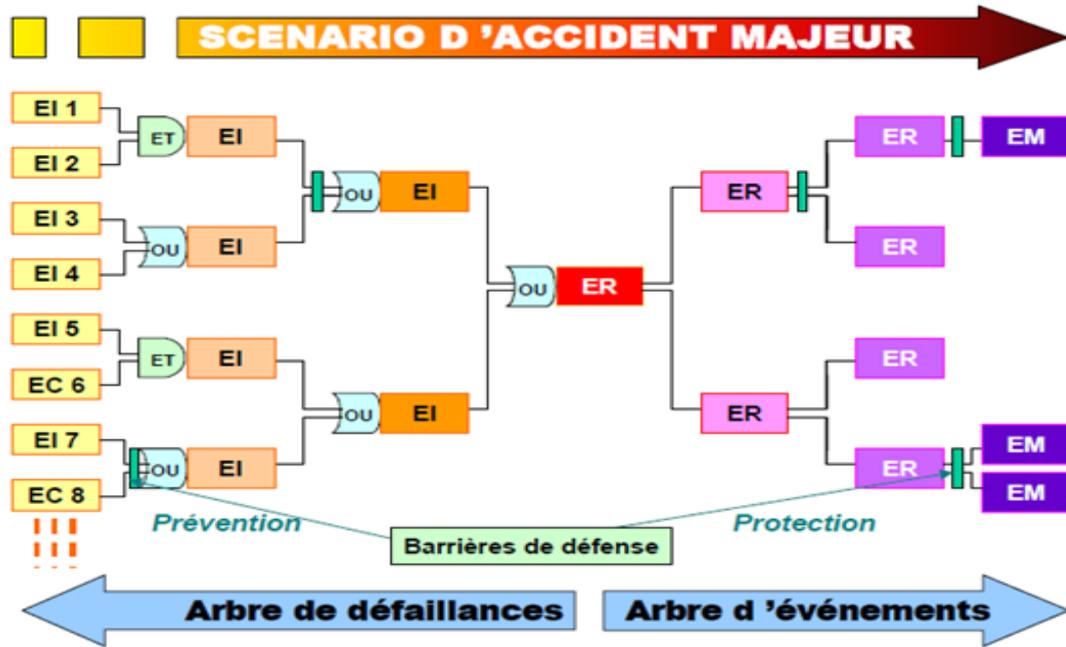


FIGURE 1.2 – Représentation des scénarios d'accidents selon la méthode du nœud papillon

1.3.5 Avantages et limites de la méthode

Un des principaux intérêts de la démarche « nœud papillon » est qu'elle permet de présenter clairement l'action des différentes barrières de sécurité disposées en vue de préserver les cibles (on protège le système cible du champ des dangers du système source).

Le nœud papillon offre une visualisation concrète des scénarios d'accidents qui pourraient survenir en partant des causes initiales de l'accident jusqu'aux conséquences au niveau des cibles identifiés.

De ce fait, cet outil met clairement en valeur l'action des barrières de sécurité s'opposant à ces scénarios d'accidents et permet d'apporter une démonstration renforcée de la maîtrise des risques.

En revanche, cette méthode nécessite la mobilisation de ressources importantes et peut être particulièrement coûteuse en temps. De plus la représentation schématique pour les systèmes complexes peut devenir encombrante et lourde à mettre en œuvre [9].

Chapitre 2

Application de la méthode du nœud papillon

Après avoir réalisé une analyse de risques au sein de l'usine Hamoud Boualem : une APR (Analyse Préliminaire des Risques) suivie d'une AMDEC puis d'une HAZOP, nous avons listé les scénarios capables de se produire à l'enceinte de l'usine et plus précisément les scénarios liés au système chaudière à vapeur. [10]

2.1 Présentation de la chaudière à vapeur de l'usine Hamoud Boualem

2.1.1 Le système : chaudières à vapeur

L'entreprise Hamoud Boualem dispose de deux chaudières à vapeur. La chaudière fournit la vapeur nécessaire à l'activité de l'usine. Les chaudières à vapeur sont un élément sensible du site. En effet, les chaudières à vapeur alimentées en gaz naturel présentent un risque significatif.

- Présentation de l'équipement

Voici les principales caractéristiques de la chaudière étudié :

*Volume de la chaudière :10 metre cube

*Vapeur générée : 3T/h de vapeur.

La chaudière SKG est un générateur de type horizontal à trois parcours :

*Premier parcours : Tube foyer

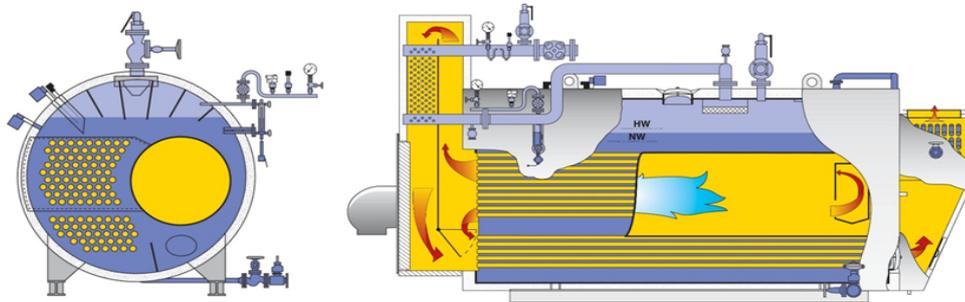
*Deuxième et troisième parcours : Tube fumée

-Le corps de la chaudière est du type horizontal à foyer intérieur et tubes de fumée. A l'arrière, le départ de fumées se trouve dans la position horizontale.

A l'avant, une boîte à fumée équipée d'une partie amovible permet un accès aisé pour une inspection coté gaz. Le corps de chaudière est calorifugé au moyen de laine de roche d'épaisseur 100mm, et de densité élevée.

L'ensemble corps de chaudière, boîtes à fumée repose sur un châssis qui reçoit le ou les groupes électropompes d'alimentation.

Dans une chaudière à tubes de fumée, les gaz de combustion circulent à l'intérieur des tubes tandis que l'eau entoure ceux-ci. L'ensemble est confiné dans une grande virole qui constitue le corps cylindrique de la chaudière. Ces générateurs sont aussi appelés « chaudières à foyer intérieur » ou « chaudière » tout court. Les coupes ci-dessous permettent de mieux comprendre les principes constructifs d'une chaudière à vapeur :



Source : BBC Loos

FIGURE 2.1 – Principes constructifs d'une chaudière à vapeur

tandis que la photo ci-dessous montre l'aspect extérieur de la chaudière à vapeur de l'Entreprise Hamoud Boualem



FIGURE 2.2 – La chaudière à vapeur de Hamoud Boualem [Source exclusive]

On voit qu'un premier « tube » de très gros diamètre constitue la chambre ou le foyer dans lequel se développe la flamme. Ensuite les fumées sont canalisées vers des faisceaux tubulaires pour terminer leur cheminement dans un économiseur éventuel qui assure le préchauffage des fumées par récupération sur l'enthalpie résiduelle des fumées. L'ensemble du « tube foyer » et des faisceaux tubulaires est noyé dans le grand volume d'eau contenu dans la virole externe qui constitue le corps de la chaudière.

La principale caractéristique des chaudières de ce type est donc de comporter un grand volume d'eau sous pression (la même que celle de la vapeur produite) avec pour conséquences premières :

- de présenter une grande inertie thermique (démarrage lent) ;
- d'être très destructive en cas d'explosion (un gros volume d'eau se transforme instantanément en vapeur).

Pour la suite de notre travail, nous allons déterminer notre événement redouté central à partir des analyses précédentes (AMDEC,HAZOP) et nous avons sélectionné deux événements redoutés centraux qui sont :

« La diminution du niveau d'eau dans la chaudière à vapeur »

« Présence de combustible imbrûlé dans le foyer de la chaudière »

Nous allons ensuite construire un arbre de défaillance(arbre des causes) qui va regrouper toutes les causes qui peuvent consuire à l'événement redouté central.

Par la suite, nous allons enchaîner avec l'arbre des événements qui va citer toutes les conséquences.

Enfin, nous allons mettre les barrières existantes et proposer d'autres barrières de sécurité si nécessaire.

2.2 Événement redouté central : Diminution du niveau d'eau dans la chaudière

2.2.1 Arbre de défaillance

La figure ci dessous montre l'arbre de défaillance :

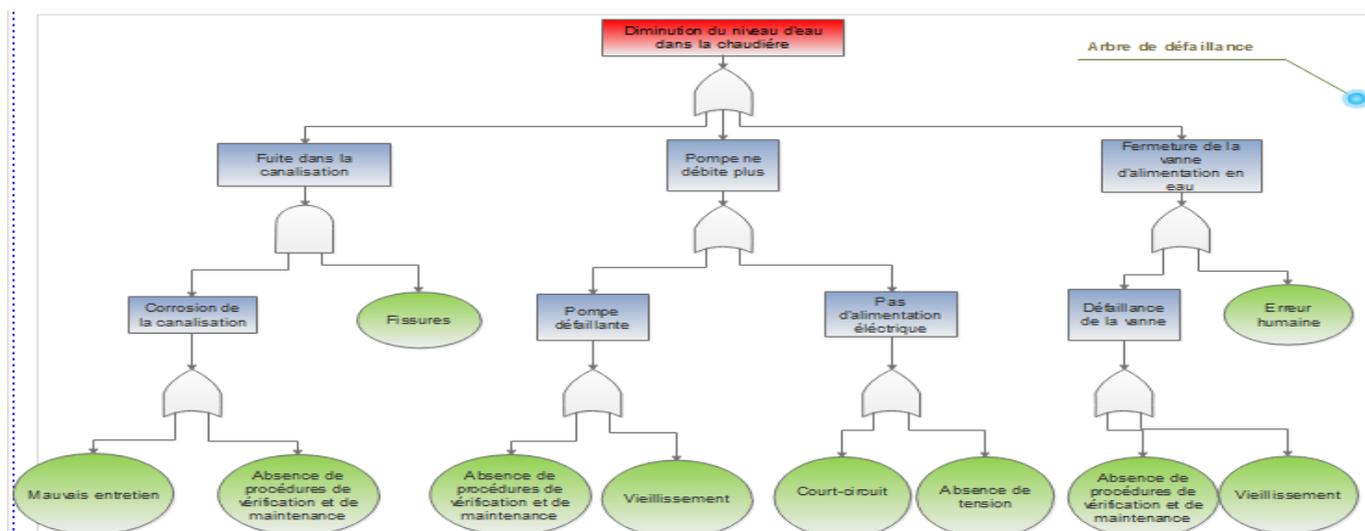


FIGURE 2.3 – Arbre de défaillance

La fuite dans la canalisation d'alimentation en eau, la fermeture de la vanne d'alimentation en eau ou la défaillance de la pompe d'alimentation en eau sont les causes principales de la diminution du niveau d'eau dans la chaudière à vapeur. Cette arborescence nous permet d'aboutir aux causes principales de notre événement redouté.

2.2.2 Arbre des événements

La figure (2.4) ci-dessous montre l'arbre des événements obtenu :

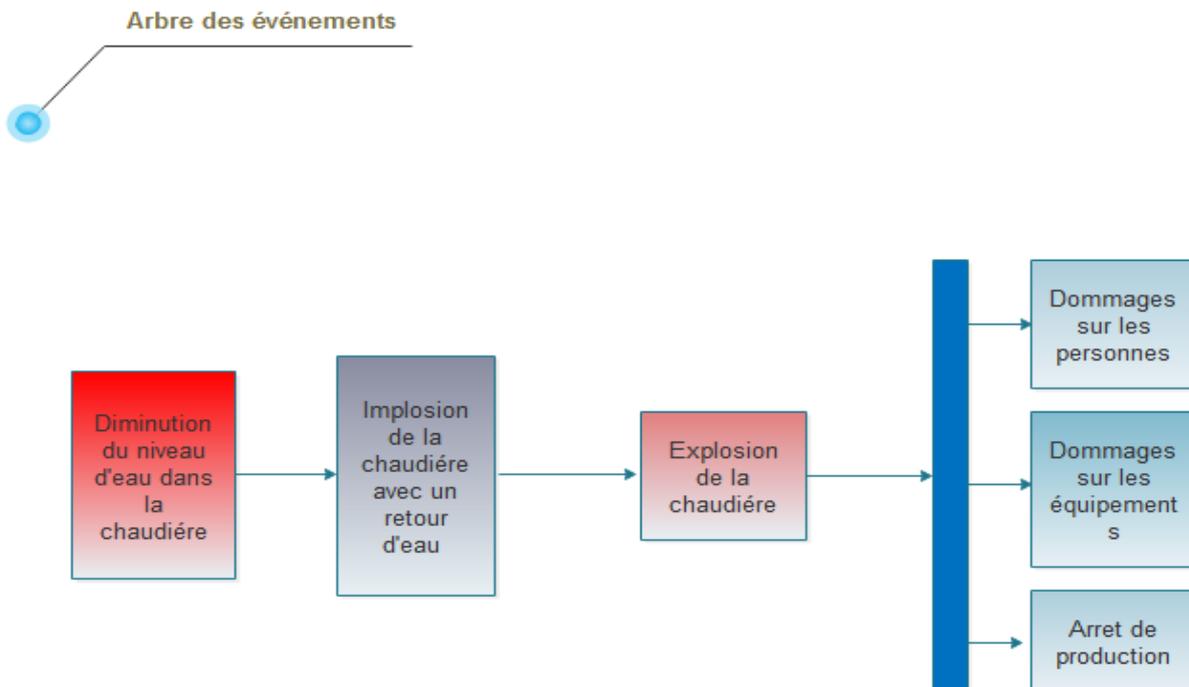


FIGURE 2.4 – Arbre des événements

L'arbre des événements nous indique que le scénario retenu : Explosion de la chaudière à vapeur suite à la diminution importante du niveau d'eau et l'implosion de la chaudière a des impacts sur les personnes et les biens d'où la nécessité d'introduire des barrières de prévention pour éviter que l'événement redouté central ne survienne, et des barrières de protection pour limiter les conséquences de cet événement.

2.2.3 Nœud papillon

Nous allons à présent combiner les deux arbres dans une même structure. La figure ci-dessous illustre le nœud papillon obtenu.

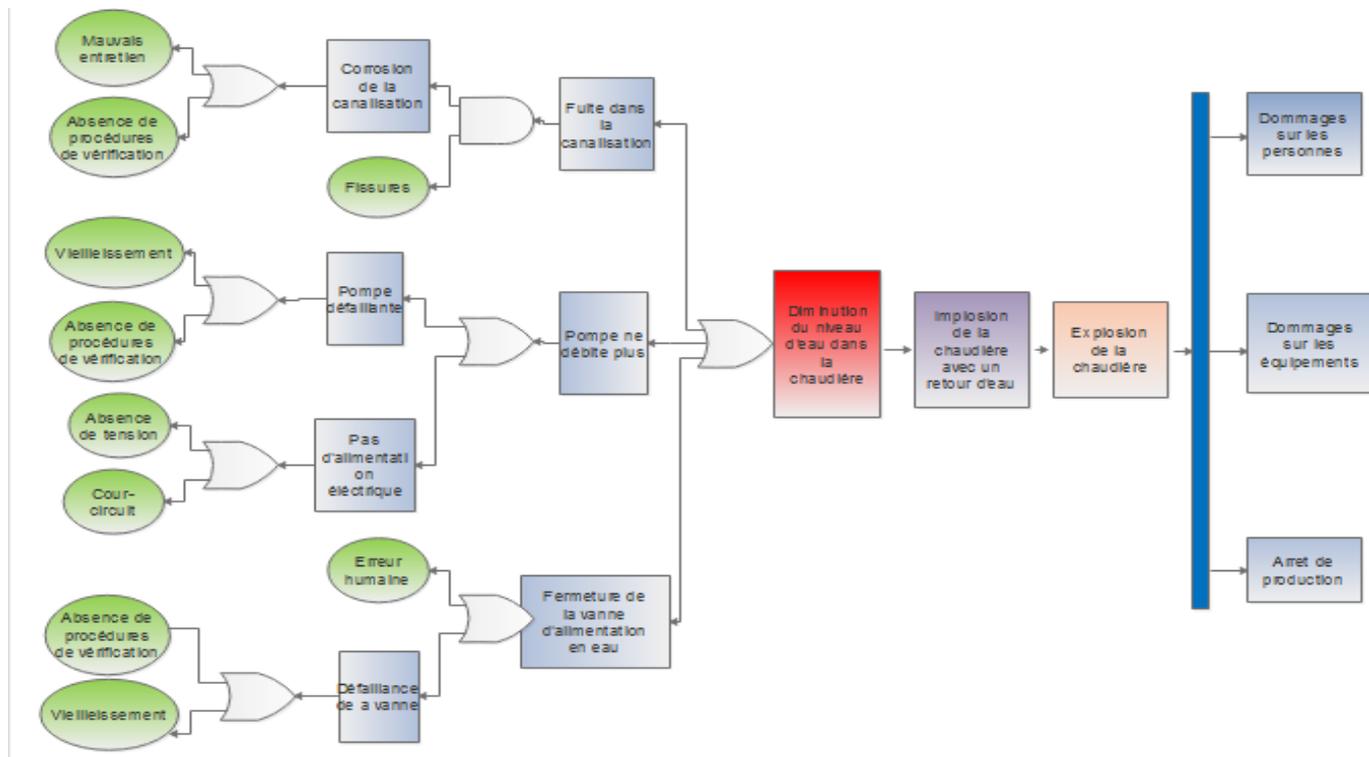


FIGURE 2.5 – Nœud papillon

Les barrières de sécurité sont indispensables pour mener à bien son analyse avec le nœud papillon d'un événement redouté.

La figure (2.6) ci-dessous nous illustre les différents types de barrières de sécurité existantes.

Avec :
 Les barrières bleues représentent les barrières de prévention et les barrières en rouge de protection.

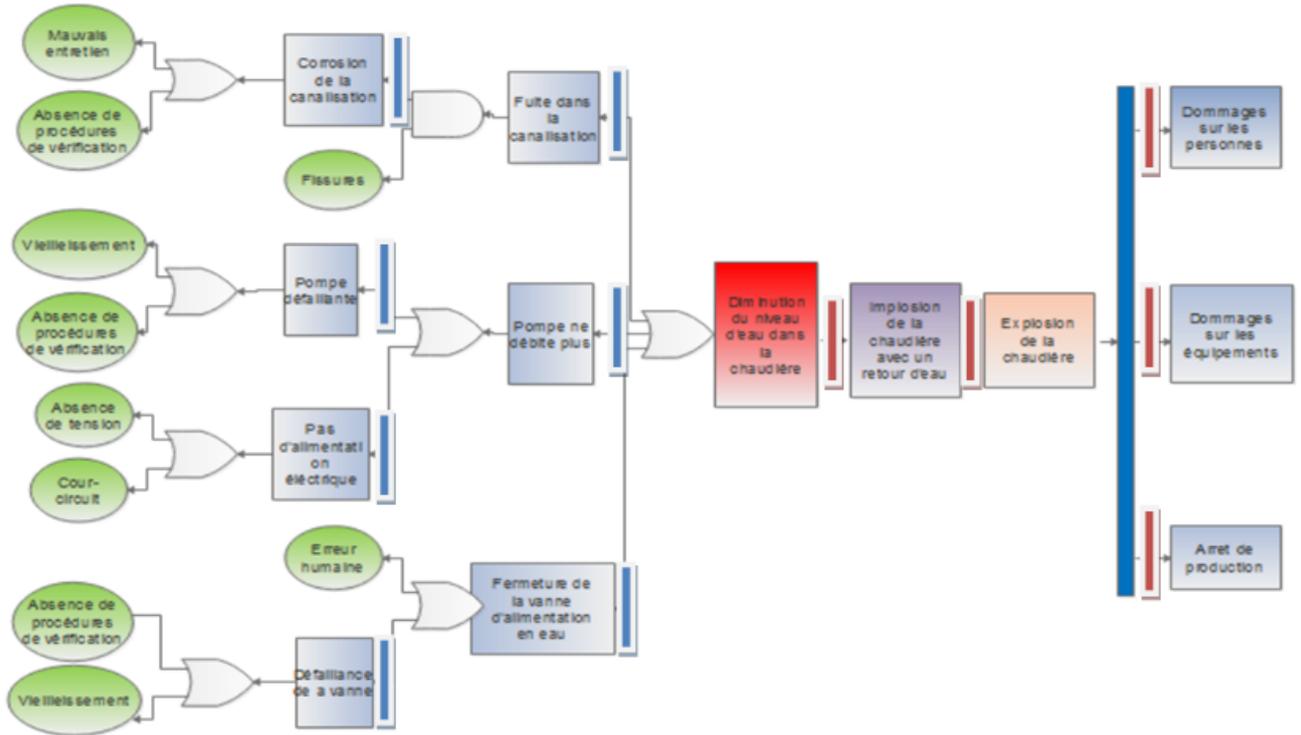


FIGURE 2.6 – Nœud papillon muni de barrières de sécurité

2.3 Événement redouté central : Présence de combustible imbrûlé dans le foyer de la chaudière

2.3.1 Arbre de défaillance

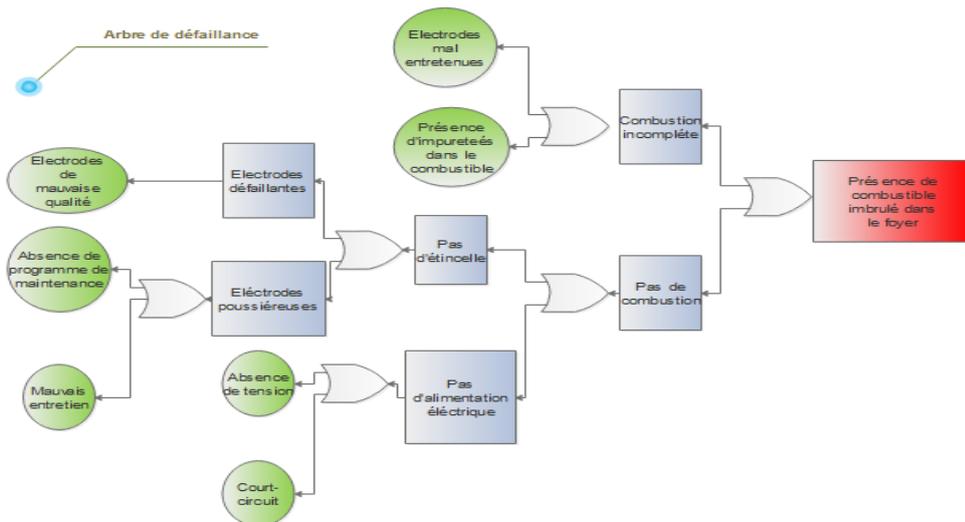


FIGURE 2.7 – Arbre de défaillance

La combustion incomplète et l'absence de combustion sont les causes principales de la présence de combustible imbrûlé dans le foyer de la chaudière à vapeur.

2.3.2 Arbre des événements

La figure ci dessous montre l'arbre des événements obtenu

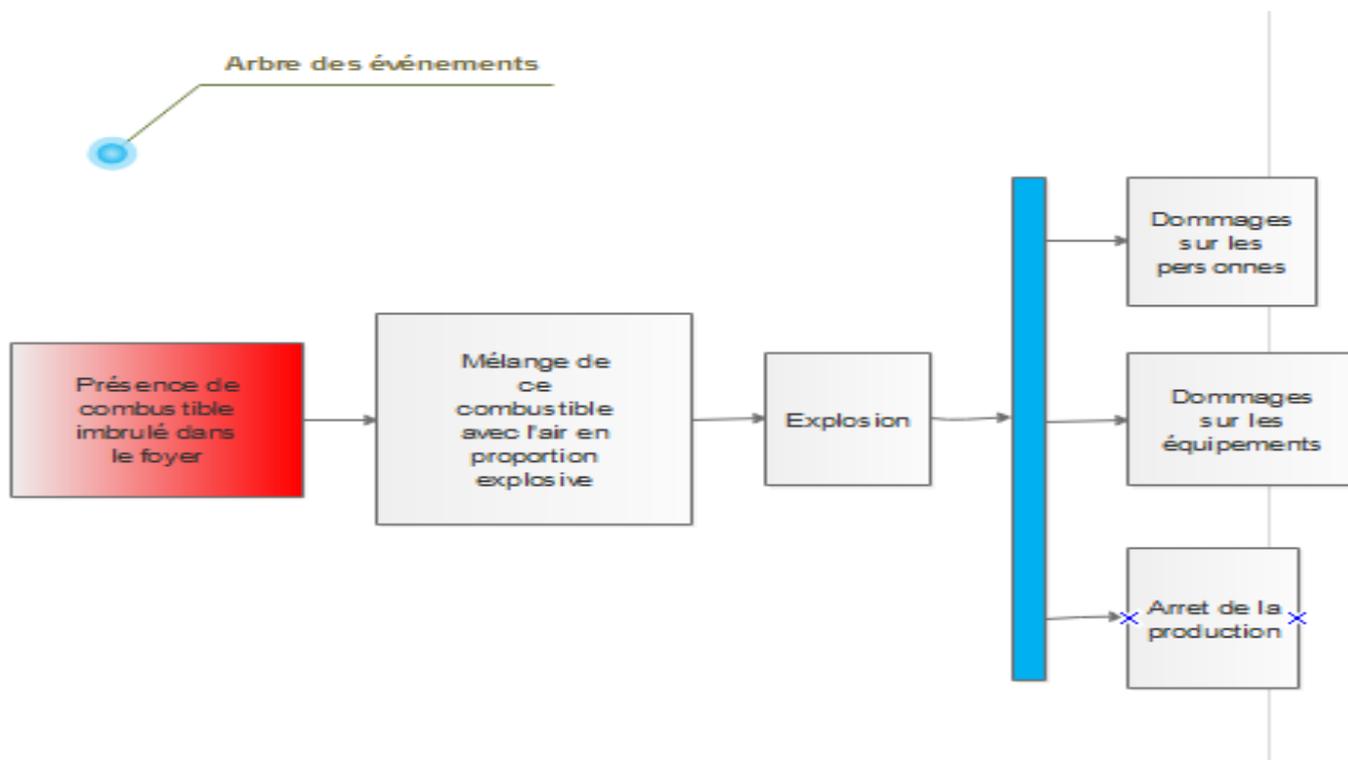


FIGURE 2.8 – Arbre des événements

L'arbre des événements nous indique que le scénario retenu : Présence de combustible imbrulé dans le foyer de la chaudière à vapeur a des impacts sur les personnes et les biens d'où la nécessité d'introduire des barrières de prévention afin d'éviter que l'événement redouté central ne survienne, et des barrières de protection pour limiter les conséquences de cet événement. Nous allons à présent combiner les deux arbres dans une même structure

2.3.3 Nœud papillon

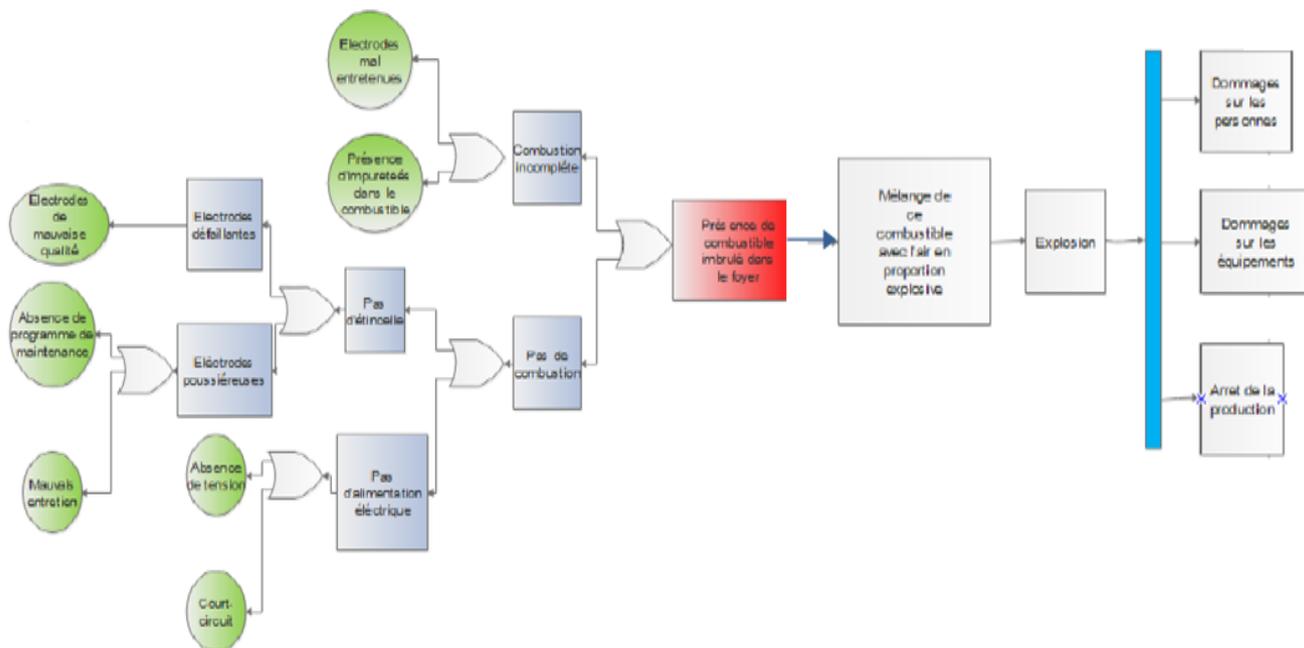


FIGURE 2.9 – Nœud papillon

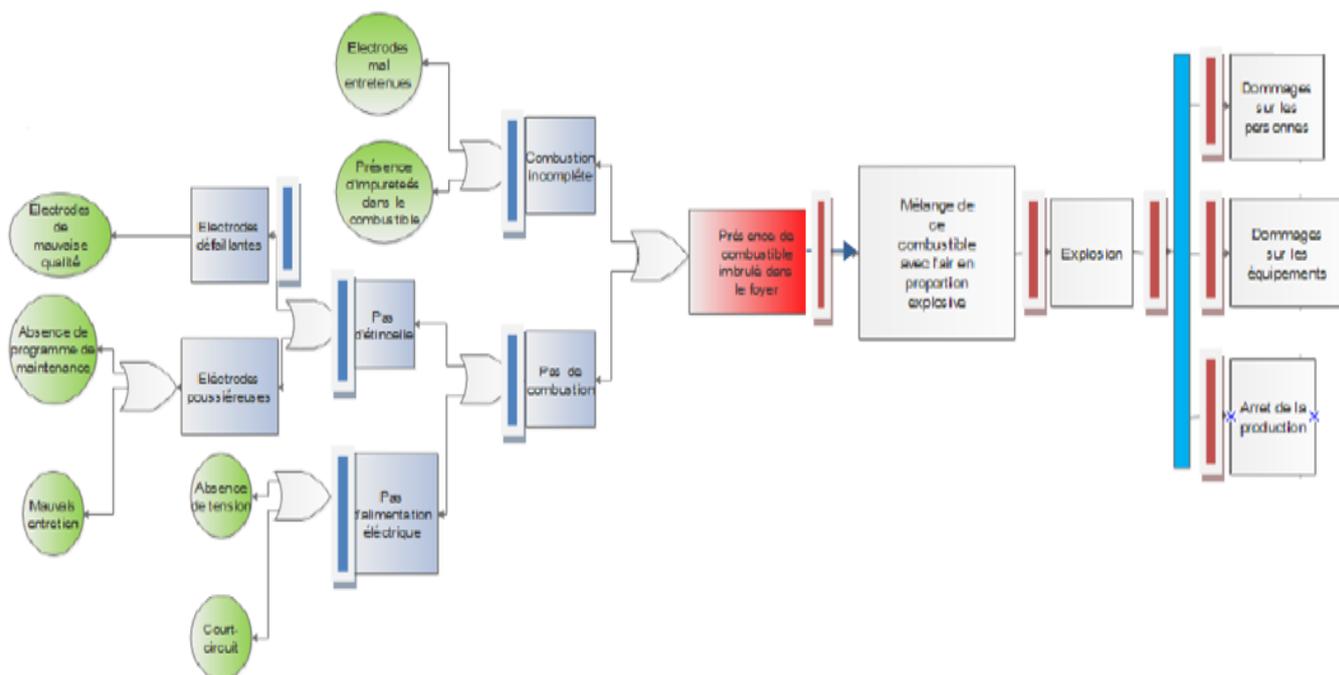


FIGURE 2.10 – Nœud papillon muni de barrières de sécurité

2.4 Les barrières de sécurité existantes au sein de l'usine HB pour la maîtrise de ces scénarios

2.4.1 Dispositifs de sécurité de la chaudière à vapeur

Un dispositif de sécurité peut être défini comme tout instrument, appareil, équipement ou autre, qui est mise en place afin d'assurer la sécurité des biens et des personnes.

Comme toute installation, la chaudière à vapeur de HB est équipée d'un système de sécurité qui permet d'assurer son fonctionnement normal, en l'absence de toute défaillance et anomalie. Ce système de sécurité est constitué de deux sous-systèmes. Ces derniers sont équipés de plusieurs dispositifs de sécurité qui permettent de préserver la sécurité de l'installation en question.

2.4.2 Barrières de prévention existantes

Les deux sous-systèmes de sécurité qui équipent la chaudière sont :

- Système mécanique de sécurité

la partie mécanique de sécurité de la chaudière. Elle comporte les dispositifs suivants :

- Les soupapes de sureté

Les soupapes de sureté : chaque chaudière est équipée de deux soupapes de sureté à ressort. Ces dernières s'ouvrent une fois que la pression de vapeur à l'intérieur de la chaudière dépasse le seuil maximal fixé par le constructeur (P au-delà de 10 bars).



FIGURE 2.11 – Soupapes de la chaudière à vapeur[Source exclusive]

- La vanne de purge de condensats

Appelée aussi vanne de sortie de vapeur, elle est située au-dessus de la chaudière. Théoriquement la vapeur est dépourvue de contaminants en sortie de chaudière. Cependant, les condensats éventuels sont des produits purs. Le but de cette purge est de prévenir une pollution des condensats par des corps étrangers, suite à un problème présent sur le réseau (échangeur percé, par exemple).

Le contrôle est généralement fait par une sonde de mesure de conductivité des condensats.

En cas de pollution, la conductivité sera sensiblement augmentée et, à partir d'un certain niveau, les condensats devront être purgés afin d'éviter de charger la chaudière en contaminants.



FIGURE 2.12 – Vanne de sureté de la chaudière à vapeur[Source exclusive]

- Les vannes de purge d'eau

Chaque chaudière est équipée de deux vannes qui assurent l'élimination des ions de l'eau d'alimentation afin d'éviter tout risque de bouchage de la chaudière.

La première vanne de purge c'est la vanne de décantation. Elle est située au milieu de la surface latérale de la chaudière. Elle permet de diminuer la concentration en sels dissous présents dans l'eau, qui se concentrent progressivement dans la chaudière.

Tandis que la deuxième vanne de purge c'est la vanne de désembuage. Elle se situe en dessous de la chaudière, et elle assure la diminution des boues qui se forment dans la chaudière, suite à la présence dans l'eau de solides en suspension.



FIGURE 2.13 – Vannes de décantation et de désembuage[Source exclusive]

- Le clapet anti-retour

le clapet anti retour est un dispositif qui empêche le retour de la vapeur et son mélange avec de l'eau qui est susceptible de causer l'explosion de l'équipement.



FIGURE 2.14 – Clapet anti-retour de la chaudière[Source exclusive]

- Système électrique de sécurité

La partie électrique de sécurité de la chaudière comporte les dispositifs suivants :

• Les deux pressostats

L'un de 10 bars et l'autre de 7 bars. Ces dispositifs permettent de détecter le dépassement des deux valeurs précédentes de la pression de vapeur.

Etant donné que la pression de service de l'usine est estimée à environ 8 bars, donc dans le cas où le niveau de pression est supérieur à 10 bars ou inférieur à 7 bars, le pressostat approprié le détecte et envoie un signal qui va engendrer la coupure du bruleur.



FIGURE 2.15 – Pressostats de la chaudière[Source exclusive]

• Les sondes de niveau

Les sondes de niveau d'eau avec le régulateur de niveau assurent le maintien du niveau d'eau à la consigne d'exploitation.

Les sondes de niveau sont immergées dans l'eau, et là nous distinguons deux cas de figures :

✓ Sondes indiquant un niveau très bas : dans ce cas l'opérateur se charge de remplir la chaudière manuellement jusqu'à ce que le niveau d'eau atteigne un niveau supérieur ce qui va engendrer le déclenchement des motopompes qui assureront le remplissage de la chaudière.

✓ Sondes indiquant un niveau bas : dans ce cas-là le brûleur s'arrête et un voyant s'allume indiquant l'arrêt du brûleur.



FIGURE 2.16 – Sondes de niveau d'eau [Source exclusive]

2.4.2.1 Dispositifs de sécurité du brûleur

- Les pressostats

Le brûleur est équipé de deux pressostats, un pressostat gaz (3-4 mbars) et un autre pressostat air (3 mbars) qui fonctionnent selon les conditions suivantes :

- Pressostat gaz (3-4 mbars) : ce dernier envoie un signal d'arrêt du brûleur au cas d'une valeur de pression de gaz dépassant les 4 mbars ou n'excédant pas les 3 mbars.
- Pressostat air (3 mbars) : au cas de dysfonctionnement du moteur, le pressostat air l'indique, ceci va permettre d'éviter les retours de flamme.

- Le capteur

Un capteur de surveillance de flamme est placé au niveau du brûleur.

-Plan d'entretien et de maintenance

L'Entreprise HB est doté d'un plan d'entretien et de maintenance pour les deux chaudières à vapeur.

- Visites régulières de contrôles par un organisme agréé

Des visites régulières par un organisme agréé sont effectuées chaque année afin de procéder à une péreuve initiale préalable à la mise en service des appareils sous pression et à des épreuves périodiques.

- Traitement quotidien de l'eau

L'eau est traitée en amont du procédé de fabrication d'une façon bien définie et sous des conditions spécifiées par les normes de qualité afin de répondre aux exigences attendues.

L'eau utilisée par HB provient de deux conduites SEAAL. L'eau est chlorée à 2 ppm à son arrivée et est stockée dans des bâches à eau. Ensuite, l'eau de production est déchlorée par un système de filtration à charbon actif jusqu'à réduction de la concentration à zéro.

Le traitement de l'eau permet de prévenir contre les risques de bouchage de la chaudière en calcaire par exemple.

2.4.2.2 Barrières de protection existantes

-Moyens d'extinction

Les extincteurs constituent une source d'extinction limitée. Leur utilisation est réservée à des feux localisés et modestes. Ils sont clairement signalés et placés à des endroits facilement accessibles à intervalles réguliers environ 20 m. Un local abritant les pompes du réseau d'incendie est réservé à ce seul effet

-Plan d'intervention interne

Outil de gestion et de planification des secours et de l'intervention et est établi conformément au décret exécutif n° 09-335 du 20 octobre 2009. Ce plan comporte l'inventaire des points sensibles, l'analyse des scénarios des risques, l'inventaire des moyens d'interventions internes et externes

-Moyens de secours en énergie électrique

L'établissement est doté d'un groupe électrogène de secours, capable d'assurer l'essentiel des besoins de l'établissement, à savoir l'éclairage extérieur et de secours.

2.5 Recommandations

Ces dispositions techniques, humaines et organisationnelles concernent l'implantation, la conception, l'exploitation et l'entretien de la chaudière. Elles permettront de réduire les risques liés à l'utilisation des chaudières vapeur :

2.5.1 Barrières de prévention

Les barrières de prévention sont des barrières destinées à prévenir l'occurrence ou à limiter les effets d'un événement redouté central ainsi elles jouent un rôle très important dans le déroulement des faits.

√ Barrières de conception

- implanter la chaudière dans un local réservé à cet effet ;
- les chaudières doivent être conforme aux exigences de sécurité.

√ Systèmes de prévention

- protéger les canalisations contre les agressions ;
- limiter l'accès au personnel qualifié ;
- la mise en place d'un capteur de température pour vérifier l'absence de combustion.

√ Procédures d'utilisation

- établir des permis de travail ;
- disposer de consignes d'exploitation ;
- mettre en place des instructions de maintenance et de nettoyage et les consignations nécessaires avant de réaliser des travaux.

√ Inspection et surveillance

- établir un programme de vérification et d'intégrité ;
- mettre à jour le plan de maintenance ;
- contrôler régulièrement les détecteurs de pression, température, flamme ... etc ;
- procéder avant toute utilisation à un examen visuel du bon état apparent : absence de corrosion, d'échauffement anormal, de fuite, etc ;
- faire procéder à des épreuves périodiques ;
- éviter la présence de câbles électriques dans le local « chaudière ».

√ Management et formation

- mettre en place un processus rigoureux de sélection du personnel ;
- former et superviser.

2.5.2 Barrières de protection

Les barrières de protection permettent de réduire la nature et l'ampleur de l'événement redouté central. Voici quelques recommandations pour l'amélioration de ces dernières au sein de l'Entreprise Hamoud Boualem.

√ Barrières de conception

- placer à l'extérieur des bâtiments un dispositif de coupure manuelle pour permettre d'interrompre l'alimentation en combustible ;

- concevoir des réseaux d'alimentation permettant de réduire les risques en cas de fuite, notamment dans les espaces confinés.

√**Systèmes de protection**

- mettre en place un système d'arrêt automatique d'alimentation en combustible ;
- s'assurer de la présence d'un dispositif limiteur de la température sur l'équipement, indépendant de sa régulation, protégeant contre toute surchauffe anormale du combustible ;
- matériels spécifiques : extincteurs automatiques dont le déclenchement doit interrompre automatiquement l'alimentation en combustible etc ;

√**Procédures d'utilisation**

- disposer de consignes d'exploitation écrites pour toute opération comportant des manipulations dangereuses et la conduite des installations (démarrage et arrêt, fonctionnement normal, entretien...).

√**Inspection et surveillance**

- disposer de moyens de secours contre l'incendie appropriés aux risques et conformes aux normes en vigueur ; les maintenir en bon état et les vérifier au moins une fois par an ;
- agents d'extinction appropriés aux risques à combattre et compatibles avec les produits manipulés ou stockés.

√**Management et formation**

- afficher des consignes précisant les modalités d'application des différentes dispositions dans les lieux fréquentés par le personnel, qui doivent notamment indiquer :
 - l'interdiction d'apporter du feu ;
 - les mesures à prendre en cas de fuite sur un récipient ou une canalisation contenant des substances dangereuses ou inflammables ;
 - les moyens d'extinction à utiliser en cas d'incendie ;
 - la conduite à tenir pour procéder à l'arrêt d'urgence et à la mise en sécurité de l'installation ;
 - la procédure d'alerte avec les numéros de téléphone du responsable d'intervention de l'établissement, des services d'incendie et de secours. . .
- mettre à jour régulièrement ces consignes ;
- informer le personnel quant aux consignes de sécurité et d'exploitation ;
- réserver strictement l'exploitation et la maintenance à des personnes formées.

Conclusion

Dans le cadre de cette étude :

1-Nous avons développé la méthode du nœud papillon en s'inspirant des scénarios issus de mon mémoire de fin d'étude et nous avons retenus deux événements redoutés centraux à savoir :

-La diminution du niveau d'eau dans la chaudière.

-La présence de combustible imbrûlé dans le foyer de la chaudière à vapeur.

2-Les deux scénarios ont été déterminés en remontant aux événements de base et en déterminant l'arbre de défaillance et l'arbre des événements de l'événement redouté central.

3-Le résultat de cette méthode nous montre clairement que les causes initiales des deux événements redoutés centraux étudiés sont d'ordre organisationnelle (Absence de programme de maintenance, mauvais entretien...).

4-L'élaboration de la méthode du nœud papillon nous a permis aussi de proposer un ensemble de recommandations afin d'améliorer l'efficacité des barrières de prévention et de protection déjà mises en place pour les deux événements étudiés.

Cette méthode est cependant complexe et longue à mettre œuvre, et sera privilégiée pour les événements particulièrement critiques pour lesquels le niveau de risque est élevé et requiert une maîtrise des risques importante.

Bibliographie

1. Guide ISO/CEI 73-Vocabulaire du management du risque, 2009.
2. Journal Officiel de la République Algérienne Démocratique Populaire, N° 84. JORDAP, n° 04-20, 2006.
3. Bernuchon E. et Salvi O. Elements Importants Pour la Sécurité(EIPS), in formalisation du savoir et des outils dans le domaine des risques majeurs(DRA-35).6, 2003.
4. Durable, M.F.D.L.É.E.D.D, Évaluation des performances des barrières techniques de prévention et de protection pour réduire les risques majeurs Résumé,in INERIS-DRA, 2002.
5. Evaluation des performances des Barrières Techniques de sécurité.Oméga 10.INERIS, 2008.
6. Mise en oeuvre de la nouvelle approche d'analyse des risques dans les installations classées.Jean Claude Couronneau, 2003.
7. Olivier IDDIR, 29 juin 2012, Le nœud papillon : une méthode d'analyse de risques, article issu de : Environnement- Sécurité / métier : responsable environnement, technique de l'ingénieur SE0537.
8. Rapport intermédiaire d'opération de l'INERIS, décembre 2002, étude et recherche (DRA-014), : Evaluation des performances des barrières techniques de prévention et de protection pour réduire les risques majeurs.
9. Rapport d'étude n° INERIS-DRA-2006-P46005-CL4756, 13 octobre 2006, Formalisation du savoir et des outils dans le domaine des risques majeurs (DRA-35) -Oméga 7 ($\Omega 7$)-Méthodes d'analyse des risques générés par une installation industrielle.
10. ABAD F. et GHERBI S., Maîtrise des risques majeurs par l'application de la méthode LOPA, ENP, 2016.