

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Filière QHSE-GRI



**Projet de fin d'étude pour l'obtention du diplôme
D'Ingénieur d'Etat en QHSE-GRI**

Intitulé

**PRÉVENTION DES RISQUES MAJEURS SELON LA
METHODE ARAMIS
Cas ARCELORMITTAL Algérie**

Etudié par : M^{elle} BARKACHE Sara

Proposé par : M^r MEZIGHECHE Nouredine (ARCELORMITTAL)

Encadré par : - M^{me} BOUTEKEDJIRET Chahrazed (Professeur ENP)

- M^r BENMOKHTAR Amine (MAB ENP)

- M^r MEZIGHECHE Nouredine (ARCELORMITTAL)

Promotion Juin 2015

DÉDICACES

A mes Parents

A ma chère tante AKILA

A mon frère.

REMERCIEMENTS

Le présent rapport n'aurait pas vu le jour sans la contribution de nombreuses personnes à qui j'aimerais adresser mes vifs remerciements. En premier lieu, mes encadreurs académiques de l'École Nationale Polytechnique (ENP), Mme C. BOUTEKEDJIRET et Mr A. BENMOKHTAR pour leurs soutiens académiques et moral.

Mes sincères remerciements à M^{me} K. DJOUADI Professeur à l'Ecole Nationale Polytechnique pour l'honneur qu'elle nous fait de présider le jury ainsi qu'à M^r K. BENSARI et M^r B. TOUAHAR pour avoir accepté de juger ce travail.

Je remercie également Mme ZBOUDJ responsable de la filière QHSE-GRI à L'ENP pour l'opportunité de stage en milieu industriel.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mon tuteur au sein de l'entreprise ARCELORMITTAL, Mr N. MEZIGHECHE pour son temps et son aimable aide pour réaliser mon projet, ainsi qu'à Mr KADER pour m'avoir offert l'opportunité de réaliser mon stage pour la préparation de mon Projet de Fin d'Etudes d'Ingénieur au sein du service Prévention des Risques Professionnels (PRP).

Je suis très reconnaissante aux ingénieurs du service d'exploitation four au niveau de l'unité Laminoir de Rond à Béton (LRB), en particulier Mrs AMRANI et LOUNICE chefs de service SAP et Méthodes pour leurs grands efforts pour la réalisation de ce projet sur terrain.

Je remercie aussi Mr A.AMIAR doctorant et enseignant du module sécurité industrielle et Ingénieur de Production à SONALGAZ pour m'avoir orienté dans la démarche à suivre pour réaliser mon travail.

Je dois un grand merci au Mr C. DELVOSALLE Président de l'Institut Risques de l'École Polytechnique des Mons en Belgique, Mr Nijs Jan Duijm de l'Université de Technologie, Département Management Industriel au Danemark, et Mr Jérôme TIXIER, Responsable du Département Enseignement (MRE), à l'Ecoles des Mines d'Alès en France, pour la documentation nécessaire à la réalisation de la méthode ARAMIS.

Merci beaucoup à tous.

ملخص

عنوان: الوقاية من المخاطر الكبرى حسب طريقة أراميس (ARAMIS) . حالة ارسلور ميتال الجزائر
تشكل الوقاية من المخاطر الكبرى تحدياً للشركات المصنعة. تهدف هذه الأطروحة الى تقييم المخاطر الكبرى لمركب الحديد والصلب ارسلور ميتال الجزائر. لهذا الغرض قمنا بتطبيق طريقتين لتحليل المخاطر. الأولى عبارة عن تحليل أولي سمح لنا بتحديد الفرن كمنطقة ذات خطر رئيسي. اما الطريقة الثانية وهي أراميس (ARAMIS) التي تعد من الطرق المتكاملة والتي سمحت لنا بتحديد وتقييم حادثين خطيرين مركزيين وهما: الاختراق وتسرب الغاز. ثم تمكنا من تحديد ثلاثة ظواهر خطيرة: انفجار الغاز، حريق أنى وتشكل شعلة نارية. بعد ذلك قمنا بحساب احتمال حدوث هذه المخاطر مع الأخذ بعين الاعتبار الحواجز الامنية. وفي الأخير اقترحنا توصيات اعتمادا على النتائج التي تم الحصول عليها.

كلمات المفتاح:

خطر كبير, طريقة اراميس (ARAMIS), حدث خطير مركزي(ERC), الحواجز الأمنية, انفجار غيمة غاز(VCE)

RÉSUMÉ

Titre : Prévention des risques majeurs selon la méthode ARAMIS (cas ArcelorMittal Algérie)

La prévention des risques majeurs présente un défi aux industriels. Notre projet proposé par le complexe sidérurgique ARCELLORMITTAL Algérie rentre dans cette optique et porte sur l'évaluation des risques majeurs au niveau de l'unité Laminoir Rond à Béton (LRB). La démarche suivie pour répondre à cette problématique consiste à appliquer deux méthodes d'analyse des risques. La première est une analyse préliminaire qui nous a permis de cibler la zone four comme zone à risque majeur. La deuxième est la méthode intégrée ARAMIS ; qui nous a permis d'une part d'identifier deux évènements redoutés (ERC) : la brèche et la fuite de gaz, et d'autre part de déterminer trois phénomènes dangereux engendrés par ces ERC : explosion d'un nuage de gaz (VCE), feu de flash et feu de torche. La phase suivante a été consacrée au calcul des probabilités d'occurrence de ces phénomènes dangereux en prenant en compte les barrières de sécurité. Enfin, nous avons estimé la sévérité du VCE et proposé des recommandations suite aux résultats obtenus.

Mots-clés :

Risque majeur, méthode ARAMIS, évènement redouté central (ERC), barrières de sécurité, explosion d'un nuage de gaz (VCE),

ABSTRACT

Title: Major risk prevention according to the ARAMIS method (case ArcelorMittal Algeria)

The major risks prevention presents a challenge to manufacturers. Our project was proposed by ARCELLORMITTAL steel complex in order to assess the major risks (LRB unit). To solve the proposed problematic, this work propose an approach to apply two risk analysis methods. The first is a preliminary analysis that allowed us to target the furnace area as a major risk area. The second method is an integrated method which is ARAMIS; it allowed us to identify & evaluate two critical events (CE): the breach and the gas leak. We also determined three dangerous phenomena: VCE, flash fire and jet fire, than we calculated their likelihood of occurrence taking into account the safety barriers. At the end we estimated the severity of VCE and we have proposed recommendations according to the results obtained.

Key words:

Major risk, ARAMIS, critical event, safety barrier, Vapor Cloud Explosion (VCE)

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1-1 : Principales activités du complexe d'ARCELORMITTAL Algérie	5
Tableau 2-1: Définition des abréviations du nœud papillon [9]	17
Tableau 2-2: Correspondance entre les classes et les valeurs de	20
L'indice de sévérité S	20
Tableau 2-3 : Évaluation de la complexité des méthodes d'analyse des risques [9]	22
Tableau 3-1: Echelle de fréquence F	33
Tableau 3-2 : Echelle de gravité G	34
Tableau 3-3 : Grille de criticité de l'unité LRB pour les risques industriels.....	34
Tableau 3-4 : Classification des risques de l'unité LRB	36
Tableau 3-5: Equipements potentiellement dangereux.....	38
Tableau 3-6: Masse de référence selon la nature des substances	39
Tableau 3-7 : Résultat des calculs de l'étape A0.....	43
Tableau 3-9: Partie de la matrice croisant les événements critiques avec l'état physique des substances	45
Tableau 3-10: Analyse fonctionnelle du système four	54
Tableau 3-12: Définition des éléments de l'arbre des événements de l'ERC6 et ERC9.....	60
Tableau 3-13: Estimation qualitatif des fréquences d'occurrence par année	63
Tableau 3-14: Identification des barrières de sécurité par branche des arbres des défaillances et des événements identifiés dans l'opération MIIMA.	66
Tableau 3-16: Résultats de l'évaluation de la performance des barrières	72
Tableau 3-17 : Règles de calcul des probabilités dans un arbre des défaillances:	75
Tableau 3-18: Estimation grossière des classes de gravité par phénomène dangereux.....	80
Tableau 3-19 : Placement des DP de l'unité d'étude (LRB) dans la matrice de risque de ARAMIS.....	81
Tableau 3-20 : Seuils des effets adopté dans le cadre d'ARAMIS	82
Tableau 3-21 : Niveaux de l'indice de sévérité d'une installation[14]	84
Tableau 3-22 : Relation entre la valeur S et la distance ou cette valeur est atteinte.....	84
Tableau 3-23 : Equations linéaires S_{DP}	85

LIST DES FIGURES

Figure 1-1 : Situation géographique d'ArcelorMittal Algérie	5
Figure 1-2 : Schéma du procédé de l'entreprise ArcelorMittal Algérie	7
Figure 2-1: Principe de la méthode nœud papillon [12].....	18
Figure 2-2: Matrice des risques de la méthode ARAMIS	19
Figure 2-3 : Mécanisme d'une explosion	27
Figure 3-1: Billettes de métal	30
Figure 3-2: Rond à béton nervuré.....	30
Figure 3-3: Zones de La chaîne de production de l'unité LRB	31
Figure 3-4: Pondération des risques de l'unité LRB	35
Figure 3-5: Les opérations d'ARAMIS	37
Figure 3-4 : Etapes de la méthode MIMAH	44
Figure 3-5 : Vue latérale gauche des brûleurs de la zone I et II	47
Figure 3-6 : Vue frontale des brûleurs de la zone III et IV	47
Figure 3-7 : Le sol mobile du four.....	48
Figure 3-8 : Brûleur de la zone II de réchauffage.....	50
Figure 3-9 : Brûleurs à double flamme.....	50
Figure 3-10: Schéma de l'équipement E1.1 : Poste de détente avec ces composants	55
Figure 3-11: Schéma de l'équipement E.1.2 Zones III et IV de conditionnement et zone I de Préchauffage avec ces composants.....	56
Figure 3-12: Schéma de l'équipement E.1.3 zone de réchauffe avec ces composants	56
Figure 3-13: Arbre des événements de l'ERC	61
Figure 3-14: Vue générale de la méthode MIRAS	62
Figure 3-15 : Exemple d'identification des fonctions.....	66
Figure 3-16: Exemple de calcul de probabilité d'un événement en prenant en compte la barrière prévenir	74
Figure 3-17: Règles de calcul des probabilités de l'arbre des événements	76
Figure 3-18: Courbe de variation de la surpression en fonction de la distance du PHAST RISK.....	88
Figure 3-19 : Propagation du nuage radiale et verticale selon PHAST Risk.....	88
Figure 3-20: Courbe de variation de la surpression sur excel 2013	89
Figure 3-21: Cartographie des effets de la surpression du VCE	93

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

ARAMIS	<i>Accidental Risk Assessment Methodology For Industries: Méthodologie d'analyse des risques d'accident pour les industries</i>
CEI	Commission d'Électrotechnique Internationale
DP	<i>Dangerous Phenomena</i> : Phénomène Dangereux
ERC	Événement Redouté Central
INERIS	Institut National de l'Environnement et des Risques Industriels
ISO	<i>International Standardization Organization: Organisation Internationale de Normalisation</i>
JORADP	Journal Officiel de La République Algérienne Démocratique et Populaire
LRB	Laminoir de Rond à Béton
MIMAH	<i>Methodology for the Identification of Major Accident Hazard: Méthodologie pour l'identification des risques d'accident majeurs</i>
MIRAS	<i>Methodology for the Identification of Reference Accident Scenario: Méthodologie pour l'identification des scénarios d'accident de référence</i>
OHSAS	<i>Occupational Health and Safety Assessment Series: Série d'Evaluation de la Santé et sécurité au travail</i>
PFD	<i>Probability of Failure on Demand : Probabilité de défaillance à la demande</i>
QHSE-GRI	Qualité Hygiène Sécurité Environnement - Gestion des Risques Industriels
SIL	<i>Safety Integrity Level: Niveau de Sécurité Intégrale</i>
VCE	<i>Vapor Cloud Explosion</i> : Explosion d'un Nuage de Vapeur

SOMMAIRE

INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 CONTEXTE GÉNÉRAL, PROBLÉMATIQUE ET MÉTHODOLOGIE ...	3
1.1 Présentation de l'industrie sidérurgique	3
1.2 Présentation d'ARCELORMITTAL Algérie	4
1.3 Problématique	8
1.4 Objectifs et méthodologie.....	9
CHAPITRE 2 NOTIONS DE BASE : METHODES D'ANALYSE DES RISQUES.....	10
2.1 Concepts et définitions	10
2.2 Identification des scenarios d'accidents majeurs.....	12
2.3 Méthodes d'analyse des risques classiques	13
2.4. Méthode ARAMIS	18
2.5. Sécurité fonctionnelle et fonction de sécurité	23
2.6. Étude des effets du phénomène d'explosion de gaz	25
CHAPITRE 3 CHAPITRE 3 ANALYSE DES RISQUES	30
3.1. Présentation de l'unité d'étude	30
3.2. Analyse Préliminaire des Risques : APR	33
3.3. ARAMIS (<i>Accidental Risk Assessment Methodology For Industries</i>).....	37
3.4. Interprétations et recommandations	94
CONCLUSION.....	95
REFERENCES.....	97
ANNEXES.....	98

INTRODUCTION

L'entreprise est un acteur économique important pour la société. Elle influe directement sur la qualité de vie des citoyens. L'existence de cette entité dépend de sa capacité à répondre aux besoins de la société sans compromettre la santé et la vie de la population, de même que la qualité de l'environnement.

La société impose à l'entreprise de mieux contrôler les risques qu'elle lui fait subir. Les sources de ces risques sont dues à des dysfonctionnements techniques, organisationnels et humains dont les impacts sur les ressources de l'entreprise (objets de risques) peuvent aussi altérer le revenu de l'entreprise.

L'industrie sidérurgique, à l'instar des autres industries, comporte plusieurs procédés à risques majeurs. En effet, plusieurs accidents de type explosion du métal en contact avec de l'eau, explosion au cours du défournement d'un cubilot dans les fonderies et explosion des fours dans les ateliers de production d'alliages métalliques ont eu lieu à travers le monde. Le complexe sidérurgique SIDER Annaba a également connu une forte explosion des tours de rectification d'oxygène en 2005.

L'objectif de notre travail est de réévaluer les risques majeurs de l'unité Laminoir Rond à Béton (LRB) du complexe sidérurgique Arcelor Mittal Algérie en prenant compte les mesures de sécurité organisationnelles et techniques mises en place pour la prévention et la protection.

Afin de répondre à cet objectif, nous allons entreprendre une analyse préliminaire des risques pour toutes les zones de l'unité LRB pour cibler la zone à risques majeurs.

Puis nous appliquerons la méthode intégrée ARAMIS pour une analyse approfondie des scénarios d'accidents majeurs.

Et enfin nous nous proposons de modéliser par le logiciel PHAST les effets des phénomènes dangereux déterminés par la méthode ARAMIS.

Notre mémoire se décompose en trois chapitres :

- Le chapitre 1, est consacré au contexte général de l'étude, la problématique et à la méthodologie adoptée,
- Dans Le chapitre 2, nous définissons les notions de base et méthodes d'analyse des risques,
- Le chapitre 3, présente l'analyse des risques par la méthode ARAMIS de l'unité Laminoir de Rond à Béton (LRB), et nous modéliserons les effets de l'explosion du four à l'aide du logiciel PHAST RISK.

Nous terminerons par une conclusion où seront donnés le bilan de l'étude réalisée et des perspectives pour la poursuivre.

CHAPITRE 1 CONTEXTE GÉNÉRAL, PROBLÉMATIQUE ET MÉTHODOLOGIE

Dans ce chapitre nous allons présenter l'industrie métallurgique, en particulier l'industrie sidérurgique. Puis nous allons donner une brève description de l'entreprise ARCELORMITTAL et du procédé sidérurgique ; ce qui mettra en avant la problématique de la maîtrise des risques (volet Prévention) dans cette industrie. Enfin, nous définirons les objectifs de ce projet et la méthodologie suivie pour répondre à ces objectifs.

1.1 Présentation de l'industrie sidérurgique

En premier lieu nous présentons le secteur de la métallurgie et ces différentes activités. Ensuite, nous définirons l'industrie sidérurgique.

1.1.1 La métallurgie

Ce secteur d'activité représente la filière des métaux à partir des minerais, ou de métaux recyclés. Elle est complétée par la phase de première transformation aboutissant aux semi-produits (tôles, bandes, tubes, barres, lingots...).

Les procédés d'obtention du métal utilisent notamment les hautes températures (sidérurgie, fonderie) ou l'électrolyse (aluminium, cuivre, ...), et l'affinage à partir de vieux métaux. La métallurgie de chaque métal comprend l'élaboration des alliages dont ce métal est l'élément principal. Ce secteur comprend :

- ✓ La fabrication de l'acier et ses alliages (sidérurgie puis première transformation).
- ✓ La sidérurgie distingue les fontes brutes, les aciers bruts et les produits finis sidérurgiques. Toutefois, il convient d'associer, en aval de l'activité sidérurgique, les activités de fabrication de tubes et de première transformation de l'acier.
- ✓ La métallurgie des métaux non ferreux, stratégiques et précieux en distinguant le cas des principaux métaux (précieux, argent, platine, or, cuivre, aluminium, plomb, zinc, étain, nickel, ...),
- ✓ La fonderie est l'industrie de mise en œuvre des produits métalliques moulés (aciers, aluminium, cuivre, fontes, magnésium, plomb, titane, zinc...). La fonderie maîtrise ainsi la

métallurgie (métaux et alliages) et la géométrie (formes et volumes) des pièces qu'elle réalise.

Parmi les principales entreprises de taille mondiale de la métallurgie, nous trouvons Arcelor Mittal, Vallourec, Carbone Savoie, Eramet, Gantois.

1.1.2 La sidérurgie

Après le bois, l'acier est le matériau le plus utilisé dans le monde, devant le béton et les matières plastiques. L'acier est constitué principalement de fer, avec des teneurs en carbone inférieures à 1 % (des teneurs supérieures donnent la fonte), il contient des ajouts, en quantités variables, de divers éléments. Sa composition, mais aussi les traitements thermiques subis, son revêtement de surface..., font de l'acier un matériau comprenant de très nombreuses nuances (plus de 3500) chacune adaptée à un emploi particulier. De plus, c'est un matériau en perpétuelle évolution [4].

La fabrication de l'acier ou la sidérurgie peut se faire soit à partir de minerai (70 % de la production mondiale), soit à partir de ferrailles (30 % de la production mondiale) [4].

1.2 Présentation d'ARCELORMITTAL Algérie

ARCELORMITTAL Algérie est un complexe sidérurgique intégré détenu à 51% par le groupe SIDER et 49% par le groupe ARCELORMITTAL. Il est situé à proximité de la localité de Sidi Amar à 12 km au sud de la wilaya de Annaba (figure 1-1). La Surface du complexe est de 832 hectares et la Production nominale est de 1.2 Mt (Million tonnes) d'acier liquide brut.

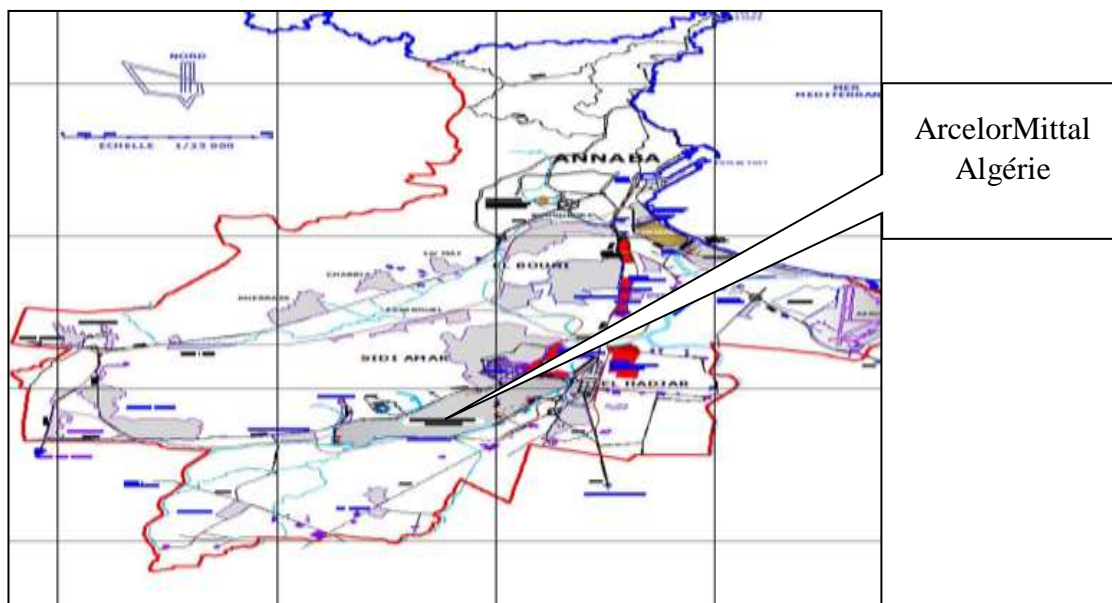


Figure 1 : Situation géographique d'Arcelor Mittal Algérie

Tableau 1-1 : Principales activités du complexe d'ARCELORMITTAL Algérie

Dénomination des installations	Activité principale
Unité de préparation matière et aggloméré (PMA)	Production d'aggloméré
Hauts fourneaux (HFx)	Production de la fonte liquide
Aciéries à oxygène (ACO1 et ACO2)	Acier liquide ACO1: Brames ACO2: Billettes
Aciérie électrique (ACE)	Acier liquide, billettes et lingots
Laminoir à chaud (LAC)	Bobines
Laminoir à froid (LAF)	Bobines, Bobines galvanisée, TN 40 galvanisées
Laminoir à fil et rond (LFR, LRB)	Fil machine et rond à béton
Unité de tuberie sans soudure (TSS)	Tubes casing et pipeline
Ateliers de construction (ATC) (AMM)	Maintenance
Atelier de traitement de surface	Électrodéposition du cuivre –nickel et chrome

1.2.1 Procédé de la sidérurgie

Les éléments déterminants de la fabrication de fer et de l'acier sont les fours à coke, où ce dernier est obtenu à partir de la houille, et les hauts fourneaux, où le minerai de fer est fondu ou réduit de manière à obtenir de la fonte. Le haut fourneau est chargé à partir du haut au moyen de minerai de fer, de coke et de calcaire. De l'air chaud, fréquemment enrichi d'oxygène est soufflé à l'intérieur du haut fourneau à partir du bas. Le carbone provenant du coke, transforme le minerai de fer en fonte contenant du carbone, produisant ainsi de l'oxyde de carbone et du gaz carbonique.

Le calcaire sert de fondant. A une température de 1600°C, la fonte fond et s'accumule dans la partie inférieure du haut fourneau, qui est vidé périodiquement de sa fonte. Celle-ci est coulée en gueuses pouvant être utilisées ultérieurement, dans les fonderies, ou déversées dans des poches permettant de les transférer, encore en fusion, dans l'aciérie.

Le but des opérations de fabrication de l'acier consiste à raffiner la fonte à haute teneur de carbone et d'autres impuretés. La teneur en carbone doit être réduite, les impuretés doivent être oxydées et éliminées, et le fer doit être transformé en un métal hautement élastique susceptible d'être forgé et mis en fabrication. A ce stade, des éléments d'alliage peuvent être rajoutés.

L'acier est parfois produit directement à partir des déchets de fonte ou d'autres matériaux ferreux, le plus souvent dans des fours à arc électrique, sans avoir à utiliser de minerai de fer ou de coke. Il est coulé en plaques, billettes, barres, lingots et autres profilés. Amorçage, décapage, adoucissement, laminage à chaud et à froid, filage, galvanisation, revêtement, coupe et découpage en bandes, ainsi que d'autres opérations destinées à fabriquer différents produits sidérurgiques, constituent autant d'étapes successives.

La sidérurgie utilise différents types de fours. Pour la fabrication du fer, les hauts-fourneaux constituent l'élément essentiel. Pour la fabrication de l'acier, il existe trois types de fours : les fours Martin, les convertisseurs à soufflage d'oxygène et les fours à arc électrique. Les fours de réchauffe sont utilisés pour le laminage à chaud.

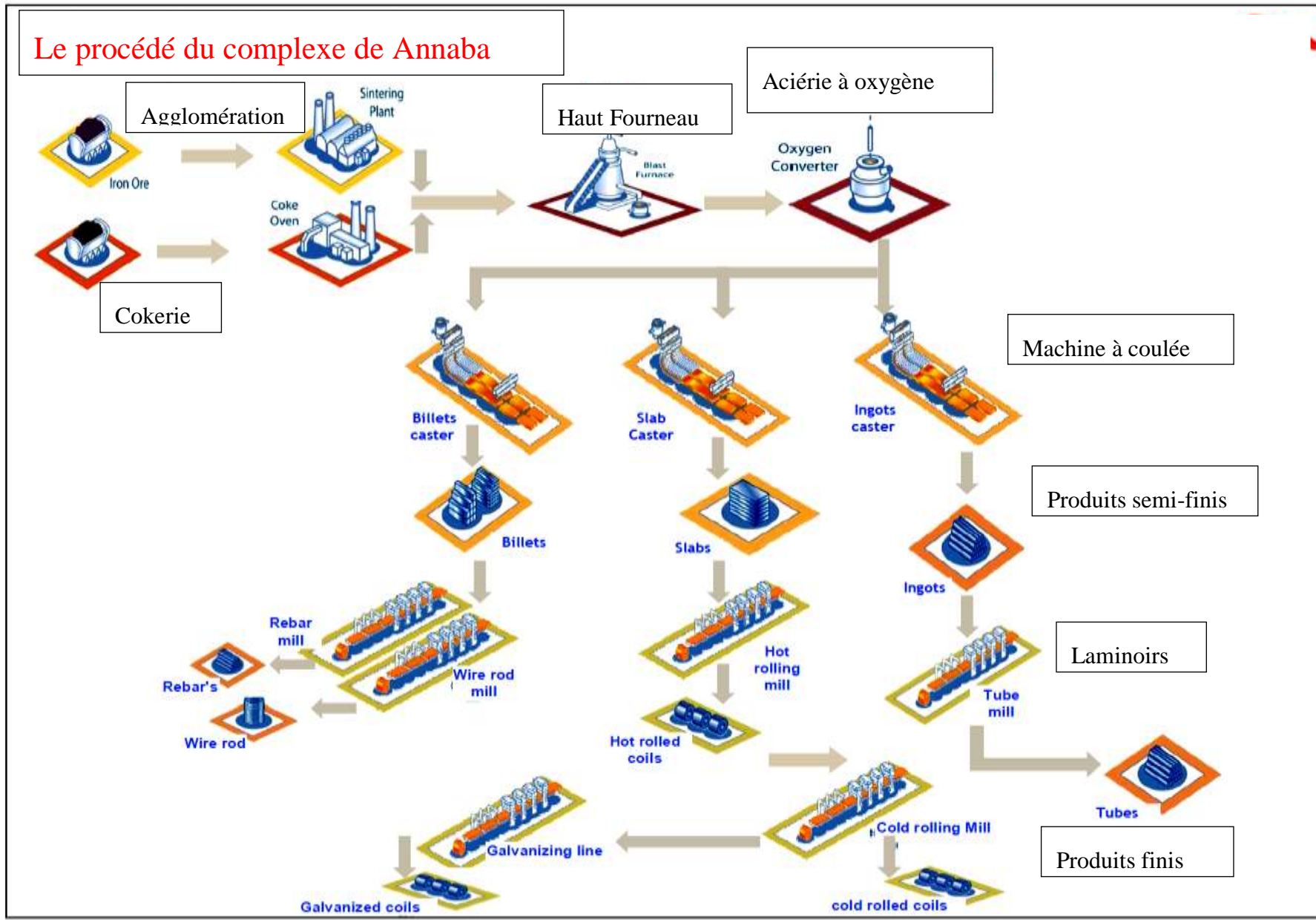


Figure 2 : Schéma du procédé de l'entreprise Arcelor Mittal Algérie (source : ARCELORMITTAL)

1.3 Problématique

Les grands établissements sont toujours porteurs de risques technologiques et industriels pouvant être considérés comme des menaces sérieuses pour l'Homme et pour l'Environnement naturel. Les industries chimiques et pétrochimiques occupent les premières places dans les risques technologiques majeurs. Les installations de l'industrie sidérurgique présentent elles aussi des risques d'accidents majeurs de types explosions, incendies et émissions de gaz toxiques.

La réglementation nationale et internationale exige des études de danger pour l'analyse des risques susceptibles de se réaliser dans une installation, avant de fournir l'autorisation d'exploitation. Cette étude se fait en phase de construction pour identifier les risques et leurs conséquences. Mais les industries peuvent confronter de nouveaux scénarios d'accidents majeurs non spécifiés dans leurs études de danger en phase d'exploitation.

C'est dans cette optique que l'entreprise Arcelor Mittal, à travers le département prévention, souhaite exprimer des besoins dans ce sens :

- ✓ Evaluation du niveau de maîtrise des risques,
- ✓ Détermination des zones à risques,
- ✓ Comment estimer l'ampleur des accidents majeurs pour la mise en place d'un plan d'action pour la maîtrise des risques majeurs.

Notre présent projet découle de ces besoins pour répondre à la question suivante :

Comment évaluer les conséquences d'un accident majeur dans son environnement en prenant compte des mesures de maîtrise de risques déjà existantes ?

1.4 Objectifs et méthodologie

Pour la résolution de notre problématique nous nous sommes fixés un certain nombre d'objectifs, à savoir :

- ✓ L'évaluation des risques majeurs,
- ✓ L'évaluation de la performance des barrières de sécurités techniques et organisationnelles,
- ✓ L'estimation des effets des scénarios d'accidents majeurs.

Avant de commencer l'étude nous avons exploré les différentes unités du complexe ARCELOMITTAL Algérie

Notre travail est constitué des étapes suivantes :

- Choix de l'unité d'étude,
- Établissement d'une analyse préliminaire des risques pour cibler la zone à risque,
- Analyse approfondie des risques adaptés à la problématique, en utilisant la méthode ARAMIS.

Le choix de la méthode ARAMIS est motivé du fait qu'elle s'intéresse aux sites industriels déjà en exploitation et qui adopte un système de management de la sécurité comme c'est le cas du site objet de notre étude.

CHAPITRE 2 NOTIONS DE BASE : METHODES D'ANALYSE DES RISQUES

Dans ce chapitre nous présentons les différentes approches et méthodes d'analyse des risques les plus utilisées et montrer les avantages de la méthode utilisée dans ce travail à savoir la méthode ARAMIS. Sont également abordés les différents modèles qui permettent de modéliser des effets d'une explosion de gaz.

2.1 Concepts et définitions

Dans cette partie et pour être sure de parler des mêmes notions et concepts, nous proposons de présenter les définitions utilisées dans notre travail.

2.1.1 Notion de danger et de dommage

La norme EN 292-1, définit le danger comme suit :

- ✓ Danger, ou phénomène dangereux : Cause capable de provoquer une lésion physique et/ou une atteinte à la santé. (Source potentielle de dommage).

La norme EN 1050 donne la définition suivante :

- ✓ Dommage : Lésion et/ou atteinte à la santé.

Par contre, 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.

2.1.2 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» suivant (ISO/CEI 51),

- ✓ **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)[5]

✓ **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)[5].

✓ **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 [6].

✓ **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 [6].

Le scénario d'accident majeur peut être défini comme l'enchaînement d'évènements indésirables (EI), aboutissant à un événement redouté central (ERC) qui conduit à un ou des événements majeurs (EM) [7].

- Un **Évènement 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.
- 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.

- Un **Événement Majeur** (EM) est un événement critique aux conséquences finales lourdes [7].

2.2 Identification des scénarios d'accidents majeurs

Les scénarios d'accidents majeurs doivent être identifiés et étudiés au cours d'analyses des risques menées en groupe de travail. L'analyse des risques ne se résume pas pour autant à un travail en groupe et doit intégrer, au minimum, les étapes préliminaires suivantes :

- Identification des potentiels de dangers sur la base des dangers liés aux produits et à leurs conditions de mise en œuvre,
- Identification des sources externes de risque, qu'elles soient d'origine naturelle (séisme, foudre, inondations, etc.), ou liées à l'activité humaine (effets dominos, voies de communication, malveillance, etc.),
- Analyse des accidents passés sur les installations étudiées ou des installations similaires.

L'analyse des risques en groupe de travail s'apparente à un travail de réflexion mené de façon systématique grâce à des outils d'analyse des risques. Il existe de nombreux outils qui, adaptés au contexte des accidents majeurs, permettent de guider la réflexion du groupe de travail [11].

Quel que soit l'outil utilisé, la démarche consiste toujours, dans un premier temps, à identifier une dérive ou défaillance de départ, à en identifier l'ensemble des causes et enfin, à en caractériser l'ensemble des conséquences (à savoir les effets sur les cibles). Ce travail vise à déterminer des événements redoutés ; complété par des approches inductives, il permet de bâtir des scénarios d'accidents [11].

Bien entendu, au cours de la réflexion, de nombreux scénarios peuvent être identifiés sans qu'ils concernent tous la problématique des accidents majeurs. Il y a alors lieu d'identifier les scénarios d'accidents critiques (potentiellement majeurs) qui devront être étudiés dans le cadre d'une étude des dangers. Les autres scénarios ne seront pas quant à eux détaillés dans le cadre de l'étude.

L'identification des scénarios d'accidents majeurs est réalisée au sein du groupe de travail sur la base d'une évaluation semi-quantitative des dommages potentiels au niveau des cibles.

Pour cela, une échelle de cotation de la gravité est définie par le groupe de travail au départ de l'analyse des risques. Le tableau 1 présenté ci-après fournit un exemple d'échelle de cotation de la gravité des accidents proposée par la réglementation française pour les établissements classés SEVESO [11].

Notons qu'à ce stade, il s'agit d'identifier des enchaînements d'évènements qui, s'ils ne sont pas maîtrisés, pourraient conduire à des dommages majeurs sur les cibles. Dès lors, l'identification des scénarios d'accidents majeurs doit être réalisée en négligeant l'action de toutes les barrières de sécurité éventuellement présentes. La suite de l'analyse des risques consistera à démontrer que ces barrières sont effectivement correctement dimensionnées vis-à-vis des risques identifiés.

2.3 Méthodes d'analyse des risques classiques

Nous présentons dans cette section les méthodes classiques d'analyse des risques ainsi que la méthode intégrée ARAMIS.

2.3.1. Analyse Préliminaire des Risques (APR)

La méthode d'analyse préliminaire des risques repose sur deux enchaînements :

- Éléments dangereux + agression = situation dangereuse
- Situation dangereuse + événement aggravant = accident

Il s'agit donc, dans un premier temps, d'identifier les éléments dangereux du système, puis pour chaque élément dangereux d'identifier les situations dangereuses possibles. Nous pouvons alors déterminer les accidents et leurs conséquences ainsi que lister les sécurités existantes et les évaluer [9].

2.3.2. HAZOP/ *What if*

L'objectif de la méthode HAZOP est triple :

- Analyser les conséquences des dérives des paramètres de fonctionnement d'une installation mettant en œuvre des fluides dangereux,
- Exemples de paramètres : température, pression, débit etc.,
- Proposer des actions correctives,
- Réaliser un suivi des actions.

La méthode HAZOP est dédiée à l'analyse des risques des systèmes thermo-hydrauliques pour lesquels il est primordial de maîtriser les paramètres (température, pression, débit...). Elle suit une procédure semblable à celle de l'AMDEC, excepté que l'HAZOP considère les dérives potentielles des principaux paramètres liés à l'exploitation de l'installation.

Pour chaque partie constitutive du système examiné, la génération des dérives est effectuée de manière systématique par la conjonction de :

- Mots-clés comme par exemple « Pas de », « Plus de », « Moins de », « Trop de » ;
- Paramètres associés au système étudié.

Mot-clé + Paramètres = Dérive

La méthode *What-if* est une méthode dérivée de la méthode HAZOP. Elle ne se base plus sur le principe de Dérive = Mot-clé + paramètres, mais se demande « QUE se passe-t-il si tel paramètre ou comportement n'est pas celui attendu ? ». Cette méthode repose essentiellement sur l'expérience des personnes du groupe de travail [9].

2.3.3. Analyse des modes de défaillances, de leurs effets et de leur criticité (AMDEC)

Cet outil permet d'évaluer les défaillances en vue de déterminer la fiabilité d'un équipement ou d'un système. L'AMDEC peut se baser sur des :

- Équipements, des matériels : analyse de détails (dysfonctionnement) ;
- Produits, installations et opérations : analyse en situation

A partir de ces éléments, les modes de défaillances possibles sont établis. Il est possible alors d'identifier les causes de ces défaillances puis leurs conséquences. Les modes de défaillances sont nombreux et variés.

Ils peuvent donner lieu à plusieurs types de défaillance : complète, partielle, intermittente, dans le temps, performance supérieure à la fonction. Notons que les modes de défaillance sont fonction des utilisations du système, des caractéristiques de l'équipement considéré, du mode de fonctionnement, des spécifications relatives au fonctionnement, des délais fixés et de l'environnement [9].

3.3.4. Arbres de défaillances

L'arbre de défaillance est une méthode qui part d'un événement final pour remonter vers les causes et conditions dont les combinaisons peuvent le produire.

La construction et l'utilisation d'un arbre de défaillance se font dans le cadre d'une étude a priori d'un système. Ayant pour point de départ un événement redouté (dysfonctionnement ou accident), la démarche consiste à s'appuyer sur la connaissance des éléments constitutifs du système étudié pour identifier tous les scénarios conduisant à l'événement redouté. L'arbre de défaillance est une représentation en deux dimensions des événements de base ou intermédiaires qui peuvent conduire à l'événement redouté.

Nous pouvons ensuite utiliser cette représentation pour calculer la probabilité de l'événement redouté à partir des probabilités des événements élémentaires qui se combinent pour le provoquer.

Dans un premier temps, il s'agit donc de définir les événements de base susceptibles d'être à l'origine de l'événement redouté. Les événements de base correspondent généralement à des :

- Événements élémentaires qui sont généralement suffisamment connus et décrits par ailleurs pour qu'il ne soit pas utile d'en rechercher les causes, leur probabilité d'occurrence est également connue.
- Événements ne pouvant être considérés comme élémentaires mais dont les causes ne seront pas développées faute d'intérêt.
- Événements dont les causes seront développés ultérieurement au gré d'une nouvelle analyse par exemple.
- Événements survenant normalement et de manière récurrente dans le fonctionnement du procédé ou de l'installation.

Quelle que soit la nature des éléments de base identifiés, l'analyse par arbre des défaillances est fondée sur les principes suivants :

- Ces événements sont indépendants.
- Ils ne seront pas décomposés en éléments plus simples faute de renseignements, d'intérêt ou bien parce que cela est impossible.
- Leur fréquence ou leur probabilité d'occurrence peut être évaluée.
- Les liens entre les différents événements identifiés sont réalisés grâce à des portes logiques (de type « ET » et « OU » par exemple). Cette méthode utilise une symbolique graphique particulière qui permet de présenter les résultats dans une structure arborescente.
- Les conventions de présentations utilisées sont celles de la norme CEI 61025 : 1990 « Analyse par arbres de pannes ».

- Enfin, à l'aide de règles mathématiques et statistiques, il est théoriquement possible d'évaluer la probabilité d'occurrence de l'événement final à partir des probabilités des événements de base identifiés [9].

3.3.5. Arbres d'événements

L'arbre des événements est une méthode proche de l'arbre des défaillances. Il vise à estimer, à partir d'un événement initiateur, d'une défaillance origine, la dérive du système en envisageant de manière systématique le fonctionnement ou la défaillance des dispositifs de détection, d'alarme, de prévention, de protection ou d'intervention... Ces dispositifs peuvent concerner des moyens automatiques, humains ou organisationnels.

La réalisation d'un arbre d'événements permet de déterminer la probabilité d'occurrence des différentes conséquences à partir des séquences identifiées. Cette dernière ne peut être effectuée qu'à partir d'un arbre d'événements préalablement réduit. La réduction de l'arbre concourt, entre autres, à éliminer les chemins non physiquement possibles ainsi qu'à identifier les modes communs de défaillances. Cette opération est nécessaire pour assurer l'indépendance des événements intermédiaires présentés. La probabilité d'occurrence d'une conséquence suite à une séquence particulière peut alors être estimée, pour des événements indépendants, comme le produit de la probabilité d'occurrence de l'événement initiateur et de la probabilité de défaillance ou de fonctionnement selon le cheminement des événements intermédiaires [9].

3.3.6. Nœud Papillon

Le «Nœud Papillon» est une approche de type arborescente largement utilisée dans les pays européens comme les Pays-Bas qui possèdent une approche probabiliste de la gestion des risques. Il est utilisé dans différents secteurs industriels. C'est un outil qui combine un arbre de défaillance et un arbre d'événements. Le point central du Nœud Papillon, appelé ici Événement Redouté Central, désigne généralement une perte de confinement ou une perte d'intégrité physique (décomposition). La partie gauche du Nœud Papillon s'apparente alors à un arbre des défaillances s'attachant à identifier les causes de cette perte de confinement. La partie droite du Nœud Papillon s'attache quant à elle à déterminer les conséquences de cet événement redouté central tout comme le ferait un arbre d'événements.

Sur le schéma de la figure 2-1, les barrières de sécurité sont représentées sous la forme de barres verticales pour symboliser le fait qu'elles s'opposent au développement d'un scénario d'accident. De fait, dans cette représentation, chaque chemin conduisant d'une défaillance d'origine (événements indésirables ou courant) jusqu'à l'apparition de dommages au niveau des cibles (effets majeurs) désigne un scénario d'accident particulier pour un même événement redouté central (le tableau 2-1 résume les termes utilisés et les abréviations).

Cet outil permet d'apporter une démonstration renforcée de la bonne maîtrise des risques en présentant clairement l'action de barrières de sécurité sur le déroulement d'un accident [9].

Tableau 2-1: Définition des abréviations du nœud papillon [9]

Désignation	Signification	Définition
E In	Évènement Indésirable	Dérive ou défaillance sortant du cadre des conditions d'exploitation usuelles définies.
EC	Évènement Courant	Évènement admis survenant de façon récurrente dans la vie d'une installation.
EI	Évènement Initiateur	Cause directe d'une perte de confinement ou d'intégrité physique
ERC ou EC	Évènement Redouté Centrale Évènement Critique	Perte de confinement sur un équipement dangereux ou perte d'intégrité physique d'une substance dangereuse
ERS	Évènement Redouté Secondaire	Conséquence directe de l'évènement redouté central, l'évènement redouté secondaire caractérise le terme source de l'accident
Ph D	Phénomène Dangereux	Phénomène physique pouvant engendrer des dommages majeurs
EM	Effets Majeurs	Dommages occasionnés au niveau des cibles (personnes, environnement ou biens) par les effets d'un phénomène dangereux
Barrières ou Mesures de Prévention		Barrières ou mesures visant à prévenir la perte de confinement ou d'intégrité physique
Barrières ou Mesures de Protection		Barrières ou mesures visant à limiter les conséquences de la perte de confinement ou d'intégrité physique

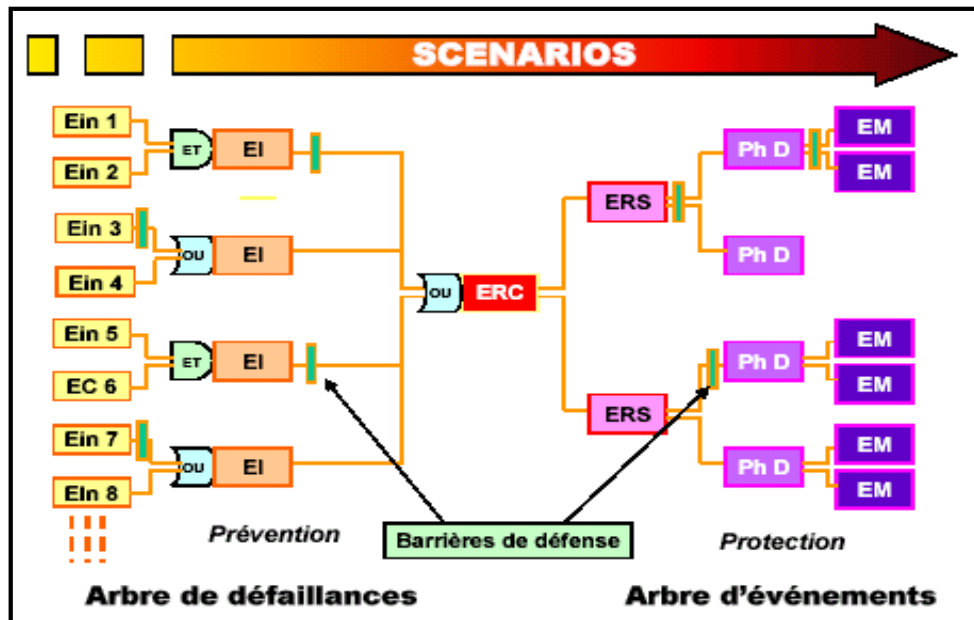


Figure 2-1: Principe de la méthode nœud papillon [12].

2.4. Méthode ARAMIS

En 2002, un groupe de travail européen a été mis en œuvre afin de comparer les méthodes d'analyses des risques pratiquées en Europe et de développer une nouvelle méthode qui permettra d'évaluer le niveau de risque d'une installation industrielle en tenant compte des mesures de sécurité. Le rapport final de ce projet a été publié en 2004 par l'institut français : Institut National des Études de Risques (INERIS).

La première étape consiste à sélectionner les équipements critiques du site. Cette sélection passe naturellement par une collecte préalable d'informations afin de préciser l'environnement du site, l'implantation des équipements, la nature des produits mis en jeu.

Après avoir identifié les produits dangereux présents sur le site, les équipements peuvent être sélectionnés en fonction de la quantité des produits dangereux qu'ils emploient. Cette première sélection est complétée par la prise en compte d'éventuels effets dominos.

La seconde étape consiste à identifier, de manière systématique, l'ensemble des scénarios d'accidents physiquement envisageables à partir de la typologie d'équipement des dangers associés à la substance impliquée. La méthode mise en œuvre est la méthode MIMAH (*Method for the Identification of Major Accident Hazard*). Ainsi, pour chaque équipement critique, il s'agit successivement :

- D'identifier les événements redoutés centraux (ERC) ou événements critiques,

- D'élaborer les arbres de défaillances ou arbres des causes associées à chaque ERC,
- D'élaborer les arbres d'événements associés à chaque ERC.

A ce stade, les équipements critiques et l'ensemble des scénarios possibles sont connus. L'étape suivante consiste à sélectionner les scénarios de référence selon la méthode MIRAS (Method for the Identification of Reference Accident Scenarios). Ce choix s'appuie sur une matrice de risques, qui définit des zones d'acceptabilité en fonction de la fréquence d'occurrence évaluée pour chacun des phénomènes dangereux. Cette dernière intègre la présence des barrières de sécurité. Le deuxième paramètre d'entrée de la matrice est la classe de gravité à priori du phénomène dangereux. La matrice de risque mise en œuvre est dans la figure 2-2.

Elle définit trois zones différentes :

- Une zone verte (effets négligeables) : elle correspond aux phénomènes dangereux avec une fréquence d'occurrence et/ou des conséquences suffisamment faibles pour ne pas être considérés comme représentatives du risque d'un établissement.
- Une zone jaune (effets moyens) : cette zone couvre les phénomènes dangereux dont la probabilité est tolérable et qui représentent le niveau de risque moyen d'un établissement. Les phénomènes de cette zone sont retenus pour une modélisation et constituent les scénarios de référence.
- Une zone rouge (effets importants) : elle comprend les phénomènes dangereux dont la probabilité d'occurrence n'est pas satisfaisante en l'état ; des barrières complémentaires de sécurité doivent être rajoutées. Les phénomènes dans cette zone sont retenus pour les modélisations et font également partie des scénarios de référence.

FREQUENCE	10 ⁻² /ans				
	10 ⁻³ /ans				
	10 ⁻⁴ /ans				
	10 ⁻⁵ /ans				
	10 ⁻⁶ /ans				
	10 ⁻⁷ /ans				
	10 ⁻⁸ /ans				
Classe de gravité	C1	C2	C3	C4	

Figure 2-2: Matrice des risques de la méthode ARAMIS

Pour chaque scénario de référence identifié, trois indices sont alors étudiés :

- L'indice **S** ou indice de sévérité ;
- L'indice **M** intégrant l'influence du management de la sécurité ;
- L'indice **V** ou indice de vulnérabilité.

L'indice de sévérité **S** permet d'apprécier le potentiel de risque représenté par un site industriel. Cet indice prend en compte les phénomènes dangereux et les événements majeurs associés. Pour chaque type d'événement, il a été convenu de définir quatre catégories de niveaux d'effets, qui seront mis en correspondance avec des intervalles de l'indice **S** (Tableau 2-2).

Tableau 2-2: Correspondance entre les classes et les valeurs de L'indice de sévérité **S**

Classe	Indice de Sévérité S	Description
1	$S < 25$	Peu ou pas d'effets
2	$25 \leq S < 50$	Effets réversibles
3	$50 \leq S < 75$	Effets irréversibles
4	$75 \leq S \leq 100$	Début des effets létaux

Un indice de sévérité **S** supérieur à 100 représente soit la possibilité d'effets dominos soit un seuil de grande létalité, notamment pour les substances toxiques. Il est alors possible d'évaluer en un point donné la sévérité cumulée d'un événement critique.

La mise en œuvre de l'indice **M** a pour objectif d'évaluer l'influence du management de la sécurité sur la maîtrise des risques d'accidents majeurs sur site. Plus précisément, il s'agit :

- ✓ d'effectuer le lien entre le management et les performances attendues des barrières caractérisées pendant l'analyse des risques ;
- ✓ d'évaluer l'influence de l'organisation de la sécurité, mise en place sur un site, sur le niveau de confiance attendu des différentes barrières.

L'indice **M** est évalué grâce à un audit de l'organisation de la sécurité et à un questionnaire portant sur la culture sécurité au sein du site et soumis au personnel.

Le dernier indice : l'indice **V** caractérise la vulnérabilité ou le degré de sensibilité de l'environnement du site face aux risques industriels indépendamment de l'installation dangereuse concernée. Il est composé de la somme des indices pondérés de vulnérabilité humaine, vulnérabilité environnementale et vulnérabilité matérielle [9].

Pour conclure cette section nous présentant dans le tableau 2-3 une évaluation de la complexité des méthodes d'analyse des risques cités avant.

Tableau 2-3 :Évaluation de la complexité des méthodes d'analyse des risques [9]

Méthodes	Fonction	Approche	Défaillances	Niveau de détail	Domaines d'application privilégiés
<i>APR</i>	Repose sur deux enchainements : => éléments dangereux + agression = situation dangereuse ; => situation dangereuse + événement aggravant = accident	Inductive	Indépendantes	+	Installations les moins complexes. Étape préliminaire
<i>HAZOP/</i> <i>What if</i>	Dédiée à l'analyse des risques des systèmes thermo-hydrauliques pour lesquels il est primordial de maîtriser les paramètres (température, pression, débit, niveau etc.)	Inductive	Indépendantes	++	Système thermo-hydraulique
<i>AMDEC (Analyse des modes de défaillances de leurs effets et de leur criticité)</i>	permet d'évaluer les défaillances en vue de déterminer la fiabilité d'un équipement ou d'un système.	Inductive	Indépendantes	++	Sous ensemble techniques bien délimités
Arbres de défaillances	Part d'un événement final pour monter vers les causes et conditions dont les combinaisons peuvent le produire	Déductive	Combinées	+++	Évènements redoutés ou indésirables préalablement identifiés
Arbres d'événements	permet de déterminer la probabilité d'occurrence des différentes conséquences à partir des séquences identifiées.	Inductive	Combinées	+++	Défaillance préalablement identifiée
Nœud Papillon	Combine un arbre de défaillance et un arbre des événements en prenant en considération les barrières de sécurité	Inductive/déductive	Combinées	+++	Scénarios d'accidents jugés les plus critiques
ARAMIS	Fait suite à une comparaison des méthodes d'analyses des risques pratique au niveau de l'Europe, et qui donne une nouvelle méthode permettant d'évaluer le niveau de risque d'une installation industrielle en tenant compte des mesures de sécurité.	Inductive/déductive	Combinées	+++	Évènements redoutés ou indésirables préalablement identifiés+ Défaillance préalablement identifiée+ matrice de risque.

2.5. Sécurité fonctionnelle et fonction de sécurité

Dans cette partie nous définissons les notions de base de la sûreté de fonctionnement dans le but de définir les niveaux de confiance des barrières techniques de la sécurité.

2.5.1. Sécurité intégrale

Les composants mécaniques, électriques, électronique ou électronique programmable que les procédés industriels possèdent remplissent des fonctions diverses. L'une de ces fonctions est la sécurité intégrale dont les initiales sont **RAMS** :

- **Reliability (Fiabilité)** : Aptitude d'une entité à accomplir une fonction requise, dans les conditions données, pendant un intervalle de temps donné.
- **Availability (Disponibilité)** : Aptitude d'une entité à être en état d'accomplir une fonction requise dans des conditions données, à un instant donné ou pendant un intervalle de temps donné, en supposant que la fourniture des moyens extérieurs nécessaires soit assurée.
- **Maintenability (Maintenabilité)** : Dans les conditions données d'utilisation, aptitude d'une entité à être maintenue ou rétablie, sur un intervalle de temps donné, dans un état dans lequel elle peut accomplir une fonction requise, lorsque la maintenance est accomplie dans des conditions données, avec des procédures et des moyens prescrits.
- **Safety (Sécurité)** : Souvent définie par son contraire : elle serait l'absence de dangers, de risques, d'accidents ou de sinistres [10].

2.5.2. Sécurité Fonctionnelle

"Sous-ensemble de la sécurité globale, relatif aux équipements et aux systèmes de contrôle-commande associés, qui dépend du fonctionnement correct de systèmes électriques, électroniques, programmables électroniques (E/E/PE) concernés par la sécurité". Ex : systèmes d'auto déclenchement, système de signalisation d'un réseau électrique interconnecté...[10]

2.5.3. Fonction de sécurité

Fonction devant être implémentée dans un système E/E/PE concerné par la sécurité dont le but est d'atteindre ou de maintenir un état sûr les équipements contrôlés, dans le cadre d'un événement dangereux particulier [10].

2.5.4. Intégrité de sécurité

Probabilité qu'un système concerné par la sécurité exécute de manière satisfaisante les fonctions de sécurité requises dans toutes les conditions spécifiées et dans une période de temps donnée [10].

2.5.5. Niveau de confiance ou niveau d'intégrité de sécurité (SIL : *Safety Integrity Level*)

Niveau discret parmi quatre niveaux possibles pour la spécification des exigences de sécurité des fonctions de sécurité à assigner aux systèmes concernés par la sécurité :

- 4 Le plus élevé.
- 1 Le plus bas.

Le concept de **SIL** s'applique donc au système concerné par la sécurité appelé aussi barrière de sécurité dans son intégralité et pas à un sous-ensemble (par exemple un capteur).

Les exigences des fonctions de sécurité sont dérivées de l'analyse de risque et les exigences d'intégrité de la sécurité sont dérivées de l'évaluation des risques.

Les SIL sont attribués au regard des études de risque prenant en compte les **défaillances dangereuses aléatoires** et **systématiques**.

Le terme défaillance signifie l'altération ou la cessation de l'aptitude d'un ensemble à accomplir ses fonctions requises avec les performances définies par les spécifications techniques. La défaillance peut être due à un dysfonctionnement, usure, action de protection, arrêt d'urgence, etc. [10]

Les paramètres suivants interviennent dans la caractérisation d'une barrière de sécurité :

- **le taux de défaillance en fonctionnement λ** : c'est la probabilité pour qu'une entité, qui a fonctionné pendant le temps t , soit défaillante au cours de l'unité de temps qui suit. On retient souvent l'hypothèse du taux de défaillance constant. Cette hypothèse est valable en dehors des périodes de début de vie de l'entité ou de fin de vie (ou la taux de défaillance augmente). On peut alors estimer le taux de défaillance par :

$$\lambda = \frac{\text{nombre de défaillances observées en fonctionnement}}{\text{durée cumulée de fonctionnement}} \quad \text{Eq-2-1}$$

Le taux de défaillances est exprimé en nombre par unité de temps. La référence de temps est souvent dans les bases de données l'heure.

- **le MTBF (*Mean Time Between Failure*)**: c'est la durée moyenne entre deux défaillances consécutives d'une entité réparée. La durée moyenne d'indisponibilité et la durée de réparation étant généralement faibles devant la durée de fonctionnement, on a : $MTBF = 1/\lambda$ Si l'entité est identique après réparation, on alors $MTBF \sim MTTF$, où le MTTF (*Mean Time To failure*) est le temps moyen de fonctionnement avant la première défaillance

- **le taux de défaillance à la sollicitation γ** : c'est la probabilité pour qu'une entité refuse de changer d'état lorsque cela lui est demandé sous forme d'une sollicitation. Pour un taux supposé constant, on peut estimer le taux de défaillance à la sollicitation par :

$$\gamma = \frac{\text{Nombre de défaillances observées à la sollicitation}}{\text{Nombre de sollicitations}} \quad \text{Eq 2-2}$$

- **le MTTR** (*Mean Time To Repair*) : c'est la durée moyenne de réparation.
- **La Probabilité de défaillance** est estimée à partir des données (généralement le taux de défaillance en fonctionnement), on utilise souvent une loi exponentielle qui est valable pour tous les composants lorsqu'on peut considérer que le taux de défaillance est constant. Ainsi, cette loi ne s'applique pas aux composants jeunes (pour lesquels des défaillances précoces sont possibles) et aux composants vieux (pour lesquels des défaillances d'usure plus fréquentes sont observées).
- **Les fiabilités $R(t)$ et probabilité de défaillance $P(t)$** sont alors :

$$R(t) = e^{-\lambda t} \Rightarrow P(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad \text{Eq-2-3}$$

Généralement on a : $\lambda.t \ll 1$ (soit temps de référence \ll MTBF), si bien que la probabilité de défaillance peut s'écrire :

$$P(t) = \lambda.t \quad \text{Eq-2-4}$$

- La probabilité de défaillance à la sollicitation (PFD) d'un composant est aussi l'indisponibilité du composant : c'est la probabilité pour que le composant soit défaillant à t et ne soit donc pas en mesure de répondre à la sollicitation.[10]

2.6. Étude des effets du phénomène d'explosion de gaz

Cette partie présente l'essentiel des modèles d'estimation des effets du phénomène explosion d'un gaz

2.6.1 Description du phénomène

Une explosion de gaz n'est schématiquement que la combustion d'un pré-mélange gazeux. La propagation de cette zone de réaction, plus communément appelée «flamme», va transformer l'énergie chimique du mélange en chaleur et en énergie mécanique (pression) [11].

Les explosions accidentelles de gaz à l'air libre, ou VCE (*Vapor Cloud Explosion*), constituent un des événements les plus redoutés dès lors qu'est considérée la sécurité des activités associées aux gaz inflammables. Ce type d'accident comprend généralement la succession d'étapes suivantes :

- ✓ Rejet dans l'atmosphère d'un produit combustible, le produit étant en phase gaz ou en phase liquide ; les combustibles liquides rejetés peuvent rester en suspension (formation d'aérosols) ou se disperser au sol pour former une flaque qui en s'évaporant conduit à son tour à un rejet diffus de gaz,
- ✓ Mélange avec l'oxygène de l'air pour former un volume inflammable, de manière concomitante, dispersion et advection du nuage de gaz dont une partie du volume reste inflammable,
- ✓ Inflammation de ce volume,
- ✓ Propagation d'un front de flamme au travers de la ou des parties inflammables du nuage ; ce front de flamme agit à la manière d'un piston sur les gaz environnant et peut être à l'origine de la formation d'une onde de pression aérienne si sa vitesse de propagation est suffisante ou si les gaz sont confinés ; dans tous les cas, la propagation des flammes s'accompagne d'une expansion des gaz brûlés qui passent par des températures de plusieurs centaines de °C et jusqu'à 2000 °C environ ;
- ✓ Enfin, le cas échéant, mélange avec l'air et combustion des parties du nuage qui étaient initialement trop riches en combustible pour être inflammables [12].

Les surpressions atteintes vont dépendre à la fois des caractéristiques du mélange, mais aussi de l'environnement physique dans lequel la flamme se propage. Le mécanisme est représenté dans la figure 2-3. La figure 2-3 met en évidence les principaux paramètres qui vont influencer sur la violence de l'explosion :

- Les caractéristiques du mélange inflammable ;
- Les caractéristiques de la source d'allumage ;
- Les caractéristiques de la géométrie (encombrement et confinement).

Elle met aussi en évidence deux modes distincts (mais pas forcément exclusifs) de génération de pression. L'augmentation de pression par confinement des gaz se produit lorsque l'expansion des gaz brûlés est physiquement bloquée (murs, parois, etc.). Les gaz brûlés ont une température significativement plus élevée que le pré-mélange d'origine, et donc un volume spécifique plus important.

Dans le cas d'un volume entièrement confiné (supposé résistant), les gaz brûlés ne disposent pas du volume nécessaire à leur expansion ce qui augmente mécaniquement le niveau de surpression. Ce mode d'augmentation de pression ne nécessite pas de vitesse de flamme élevée [11].

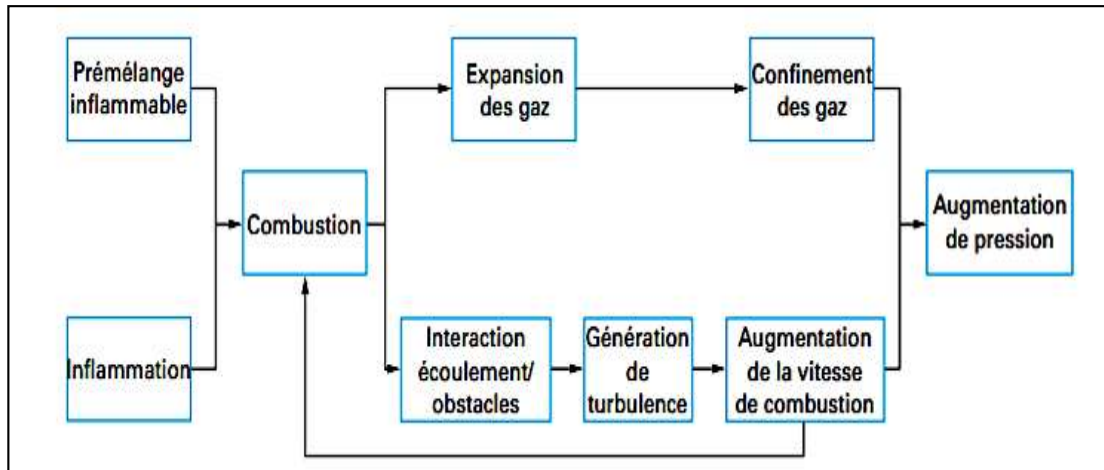


Figure 2-3 : Mécanisme d'une explosion

2.6.2 Modélisation des effets d'une explosion de gaz

Un outil de modélisation doit idéalement pouvoir prédire :

- Les caractéristiques de propagation de la flamme (et donc les surpressions) dans le nuage inflammable ;
- Mais aussi les effets des surpressions aériennes générées dans l'environnement hors du nuage (blast).

Les moyens possibles de quantification des effets sont répertoriés à la figure 2-6. Parmi les approches possibles, il est évident que la réalisation d'essais, que ce soit à petite ou grande échelle, n'est pas une solution réaliste pour des problématiques d'explosion. Les outils les plus adaptés sont les modèles mathématiques. Il convient toutefois de signaler que nombre d'entre eux ont recours à des corrélations qui reposent sur des essais. On distingue trois grands types de modèles mathématiques pour la modélisation des phénomènes d'explosion de gaz en milieu non confiné. Ils sont présentés ci-dessous par ordre de complexité croissante :

✓ les modèles analytiques

Ils s'appuient sur des corrélations qui ne contiennent peu, voire pas du tout, d'équations physiques. Ils permettent de caractériser rapidement l'onde de pression. Les modèles

analytiques sont les plus susceptibles d'être utilisés par un ingénieur en sécurité industrielle. L'intérêt de ces approches réside dans leur facile et rapide mise en œuvre. L'inconvénient est que les phénomènes y sont représentés de manière simplifiée et que ces approches n'ont qu'un domaine d'application limité.

✓ **les modèles phénoménologiques**

Ils intègrent un certain nombre d'équations physiques qui sont toutefois simplifiées pour permettre une résolution rapide et permettent de représenter les principaux phénomènes physiques résultant de l'explosion. Les modèles phénoménologiques incluent la plupart des équations de conservation (masse, énergie, etc.) complétées par certaines corrélations empiriques afin de calculer cette surpression maximale de manière plus univoque. Les modèles empiriques interviennent généralement pour décrire la flamme et les différents termes liés à la génération de turbulence.

✓ **Les modèles CFD (*Computational Fluid Dynamics ou mécanique des fluides numérique*)**

Ils s'appuient sur une résolution numérique des équations physiques et constituent donc les approches potentiellement les plus précises. La résolution numérique des phénomènes d'explosion pose un problème important. Pour une explosion, il s'agirait, en toute rigueur, de modéliser non pas l'écoulement uniquement mais aussi tous les autres phénomènes physiques (combustion, génération de la turbulence, épaisseur de flamme, onde de choc, etc.) dont l'échelle caractéristique peut être de l'ordre de l'échelle moléculaire, cela afin d'évaluer les effets de l'explosion qui peuvent s'étendre sur plusieurs centaines de mètres. En pratique, cela est impossible compte tenu des capacités des machines de calcul actuelles. Il existe ainsi des codes très sophistiqués, qui vont modéliser explicitement tous les aspects physiques. Ce sont les codes dits DNS (*Direct Numerical Simulation*). Ils sont en général destinés à la recherche et n'ont pas vocation à être utilisés pour les problématiques de sécurité industrielle, les géométries modélisées étant typiquement de l'ordre du centimètre.

Après avoir passé en revue l'ensemble des méthodes d'analyse, le chapitre suivant sera consacré à l'application de deux méthodes d'analyse à savoir :

- L'analyse préliminaire des risques (APR) qui est une méthode qualitative,**
- La méthode ARAMIS qui est une méthode intégrée semi-quantitative.**

CHAPITRE 3 ANALYSE DES RISQUES

Dans ce chapitre nous abordons la mise en pratique de notre méthodologie. En premier lieu nous présentons l'unité objet de notre d'étude le Laminoir Rond à Béton (LRB), en deuxième lieu l'APR et en troisième lieu l'application de la démarche ARAMIS à l'unité LRB.

3.1. Présentation de l'unité d'étude

Le choix de l'unité est fait sur la base de l'apport économique de cette dernière. Etant donné que 95% du chiffre d'affaire actuel vient de cette unité.

3.1.1. Présentation de l'unité d'étude (LRB)

Le LRB, laminoir à rond à béton conçu par le constructeur Italien POMINI, d'une capacité nominale de 400.000 tonnes/an, d'un coût de 44 million de dollars US, que MITTAL-STEEL (ex ISPAT) a été construit durant les premières années de son avènement en 2004, pour répondre aux besoins du marché local et national en rond à béton.

- Matière première : billettes
- Produit : rond à béton nervuré
- Clients : bâtiments et travaux publics (constructions en béton)
- Certifications : en 2010, le LRB est certifié ISO 9001 version 2008 et en 2011, il est certifié OHSAS 18001 version 2007.

Il est doté :

- D'un four à longeron mobile (constructeur BENDOTTI) d'une capacité de 80T/h qui consiste à chauffer à 1160 °C avant le défournement,



Figure 3-1: Billettes de métal (Source exclusive)

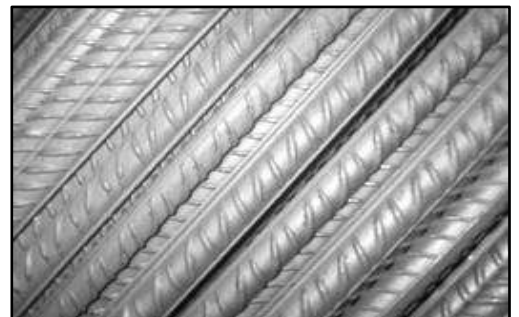


Figure 3-2: Rond à béton nervuré (Source exclusive)

- D'un système de 16 cages convertibles composées chacune de 02 cylindres –fonctionnant en position horizontale et verticale. Elles sont disposées en ligne de 06 cages de dégrossissage, de 04 intermédiaires et de 06 cages finisseuses,
- D'un thermaux, processus de traitement thermique pour améliorer les caractéristiques mécaniques,
- un système de refroidissement et de conditionnement du produit fini.

La chaîne de production du rond à béton est composée de quatre zones (Figure 3-3):

- Zone four,
- Zone laminage,
- Zone barres ou refroidissement,
- Zone expédition.

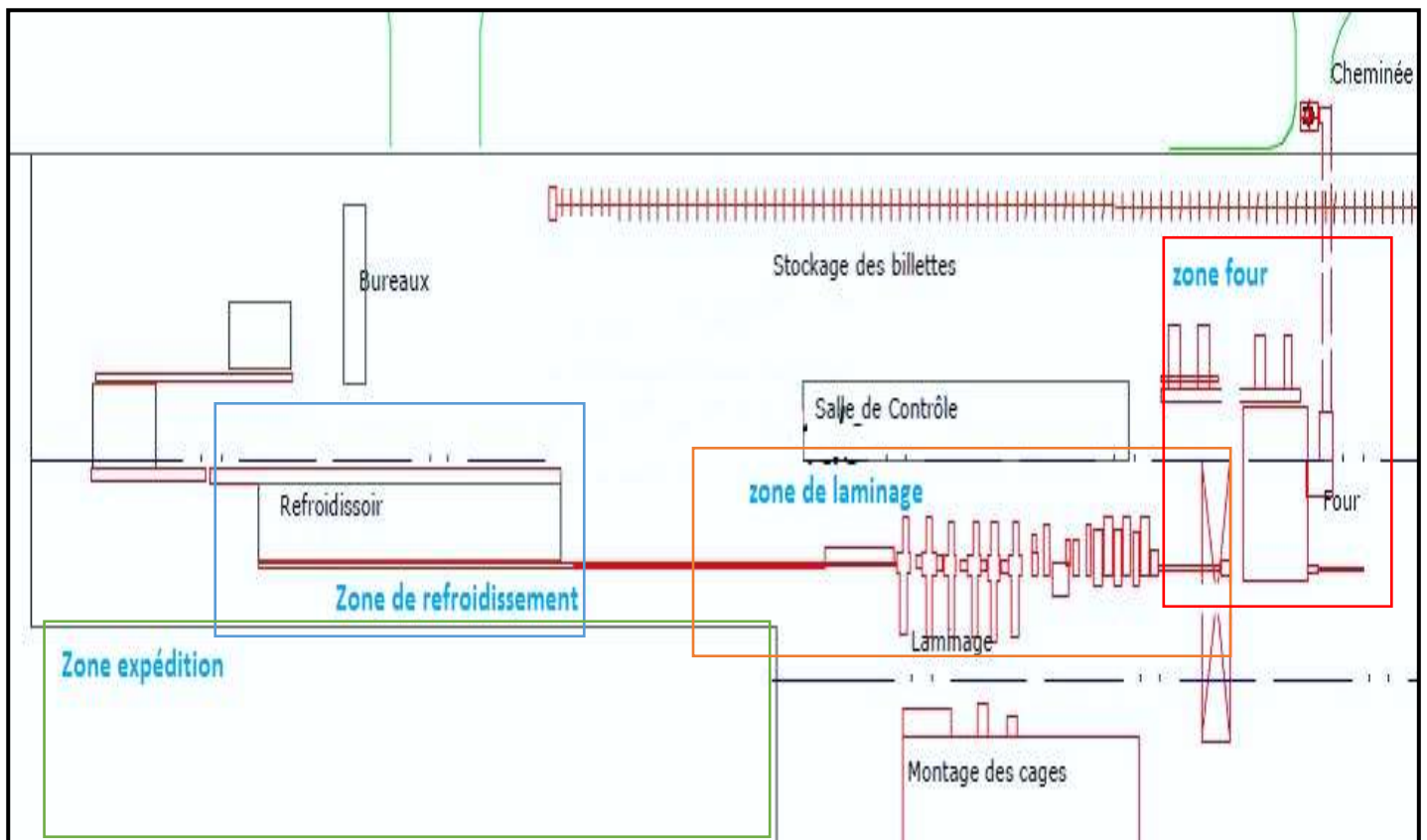


Figure 3-3: Zones de La chaîne de production de l'unité LRB (Source ARCELORMITTAL Algérie)

3.1.2 Le procédé de fabrication

Le procédé est présenté par zone.

✓ Zone Four

La cadence de production nominale du four est de 80 t/h, il est doté d'une table de chargement et table à rouleaux de déchargement.

Le four est équipé d'une zone de récupération, où les billettes sont préchauffées avec la chaleur sensible des gaz de combustion venant des zones de réchauffage. De cette façon, le préchauffage des billettes est très doux et uniforme et la température des gaz brûlés à la sortie du four est très basse, avec une épargne de combustible.

Entre les zones de préchauffage et celles de réchauffage un écran de séparation est installé afin de limiter le pliage des billettes et les pertes d'écaillés, en évitant la radiation des zones à températures élevées.

Les têtes des longerons mobiles aux soles de défournement, sont refroidies par l'eau au moyen d'un circuit approprié.

✓ Train de laminage

- Plaque de refroidissement :

Après, la mise à la longueur commerciale par la cisaille volante, elles sont envoyées au refroidisseur sur une table à rouleaux équipées de parties mobiles ascendantes.

Dans la première partie, la plaque de refroidissement comprend une série de grilles façonnées (chaque grille a une longueur de 400 mm) pour tenir la barre droite.

Les queues courtes ne sont pas envoyées à la plaque de refroidissement mais au système d'accumulation des queues courtes, qui se trouve à côté de la table à rouleaux de chargement de la plaque.

- Stockage des produits finis :

Les barres finies sont placées dans une halle parallèle à la halle de laminage. Le stockage se fait par des grues convenablement équipées.

- Mise en longueur des barres :

La cisaille volante froide à bielle est un produit unique et elle est faite pour couper en longueurs commerciales les couches des barres froides venant de la plaque de refroidissement.

3.2. Analyse Préliminaire des Risques : APR

Nous allons conduire une APR sur toutes les zones de l'unité d'étude, dans le but d'évaluer les risques présents et identifier la zone à risque majeur.

3.2.1 Méthodologie

Nous avons élaboré en premier lieu la matrice de risque avec des échelles de gravité et de probabilités adapté à l'unité LRB. Ensuite nous avons rempli les tableaux de l'APR (annexe 1) et à la fin nous avons fait ressortir les résultats pertinents.

✓ Elaboration de la Matrice de risque :

Après un débat avec le service d'implémentation du système de management OHSAS, nous avons abouti à la matrice de risque spécifique à l'unité LRB (Tableau 3-3) avec une échelle de quatre niveaux de gravité (Tableau 3-2) et quatre niveaux de fréquence (Tableau 3-1). Les échelles de la matrice que nous avons obtenu sont inspirées de l'historique des accidents dans le secteur (base de données IRIA) et l'expérience de l'équipe qui a participé à l'étude : le responsable SAP et méthodes (service maintenance) et responsable four (service exploitation).

La configuration des zones d'acceptation de risque (rouge, jaune, vert) de la matrice est basée sur la politique de sécurité de l'entreprise et le débat fait avec le responsable du service d'implémentation du système OHSAS.

Tableau 3-1: Echelle de fréquence F

Classe de fréquence	1	2	3	4
	Improbable	Peu probable	Probable	Très probable
Commentaire	Jamais rencontré ou entendu parler mais physiquement possible	Déjà (ou pourrait se) rencontrer dans ce secteur d'activité	S'est produit (ou pourrait se produire) au sein du LRB, pourrait se produire pendant la durée de vie de l'installation	S'est produit fréquemment

Tableau 3-2 : Echelle de gravité G

Classe de gravité	1	2	3	4
Effet sur l'homme	Négligeable	Modéré	Sérieux	Majeur
	Pas de blessure	Blessure légère	Blessure grave avec arrêt de travail	Mort d'une personne
Effet matériel	Sans perte	Arrêt d'un équipement avec possibilité de réparation interne sans effectuer l'arrêt de production	Perte de matériel engendre un arrêt de production pendant des jours	Des pertes significatives et détérioration du matériel engendre un arrêt prolongé de la production
Effet environnement	Pas d'effet	Rejets ou émissions négligeables	Rejets ou émission considérable	Pollution ou dommage significatifs

Tableau 3-3 : Grille de criticité de l'unité LRB pour les risques industriels

		GRAVITE			
		Négligable	Modéré	Sérieux	Majeur
		1	2	3	4
FREQUENCE	1	1.1	1.2	1.3	1.4
	2	2.1	2.2	2.3	2.4
	3	3.1	3.2	3.3	3.4
	4	4.1	4.2	4.3	4.4

Acceptation des risques

- **Zone rouge** : Risque inacceptable, il nécessite une nouvelle évaluation des risques
- **Zone jaune** : ALARP (As Low As Reasonably Possible) un niveau de risque aussi bas que possible, compte tenu de l'état des connaissances et des pratiques et de la vulnérabilité de l'environnement de l'installation.
- **Zone verte** : Risque résiduel, compte tenu des mesures de maîtrise du risque, est modéré et n'implique pas d'obligation de réduction complémentaire du risque d'accident.

✓ Déroulement

Nous avons établi un tableau sous la forme présentée ci-après pour chaque zone. Les tableaux sont en annexe 1.

zone n° :												
N°	équipement	situation de danger	causes	conséquence	F	G	NR	mesures de sécurité existantes	F'	G'	NR'	recommandations

- F : Fréquence initiale.
- G : Gravité initiale.
- NR : Niveau de risque présenté en code couleur de l'acceptation de risque.
- F' : Fréquence réelle après la considération des mesures de sécurité existantes.
- G' : Gravité réelle après la considération des mesures de sécurité existantes.
- NR' : Nouveau Niveau De Risque avec la considération des mesures de sécurités existantes.

✓ Résultats

Après déroulement de notre APR nous constatons ce qui suit :

- L'unité de procédé (quatre zones) fait ressortir **31 risques**.
- la **zone four est la zone à risque** majeur car elle contient un risque inacceptable pour l'équipement four (**R5**).
- l'unité présente 36 % de risques ALARP (zone jaune en figure 3-4), dont plus de 50 % d'eux sont présents dans la zone four.

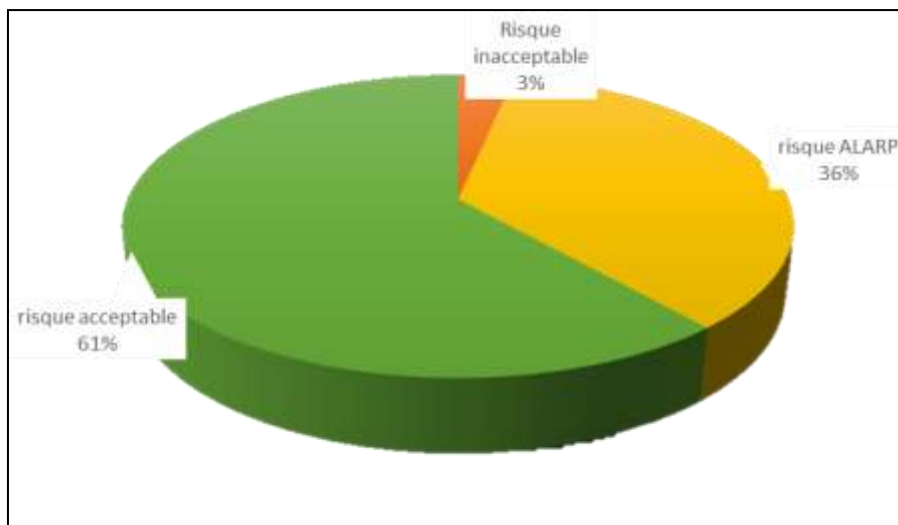


Figure 3-4: Pondération des risques de l'unité LRB

- Les risques liés à l'unité LRB sont présentés par leur code et classés dans la grille du tableau 3-4 et les risques de la zone four sont présentés en gras.

Tableau 3-4 : Classification des risques de l'unité LRB

		Gravité			
		1	2	3	4
Fréquence	1	R20	R3, R7, R9, R11, R13, R25, R27, R28, R29, R30, R31	R12, R21, R24	R4, R6, R8, R22, R23, R26
	2	R15, R17, R18	R10, R16, R19	R1, R2	R5
	3				
	4	R14			

3.3. ARAMIS (*Accidental Risk Assessment Methodology For Industries*)

ARAMIS est une méthode intégrée, elle est composée de quatre opérations principales, et chaque opération est composée de sous étapes. Dans notre étude nous avons traité deux opérations d'ARAMIS. Le schéma suivant résume la méthode (Figure 3-5) :

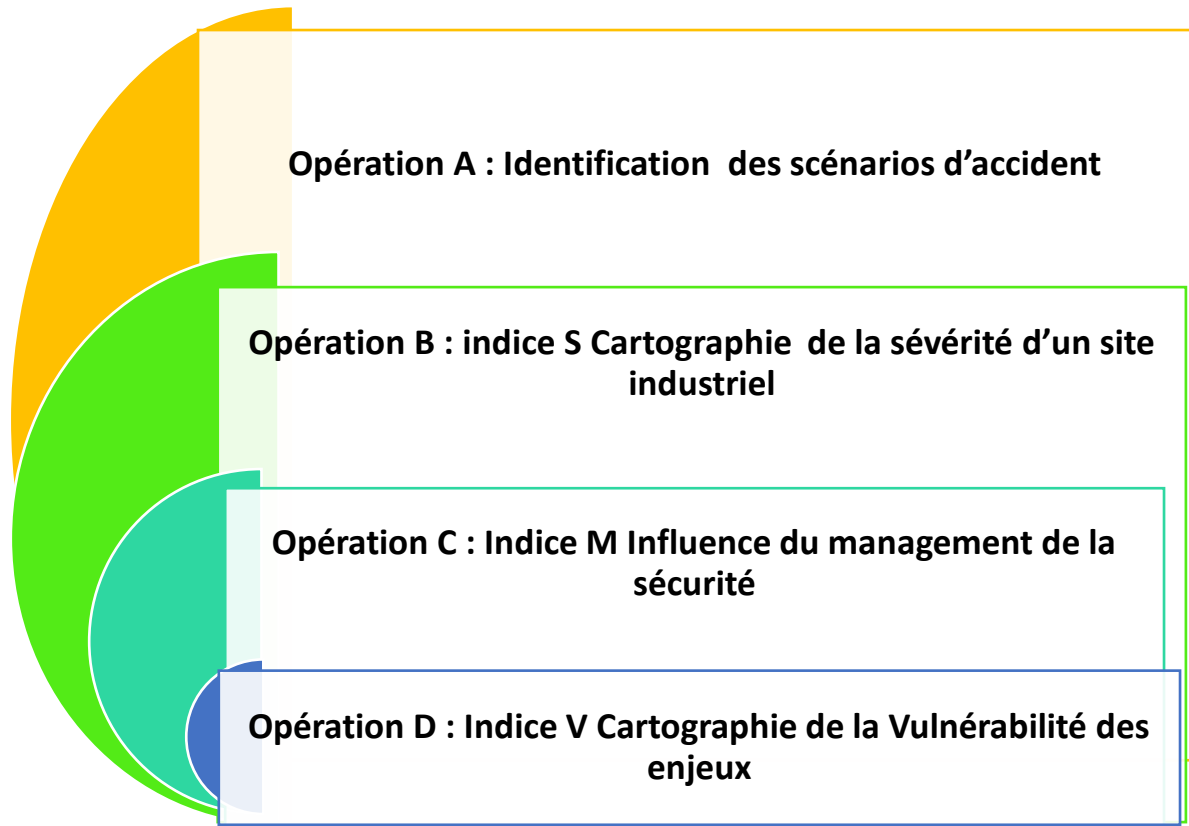


Figure 3-5: Les opérations d'ARAMIS

3.3.1. Opération A : Identification des scénarios d'accident

Cette opération se déroule en 3 étapes. La première étape A0 consiste à sélectionner l'équipement critique de l'unité LRB. La deuxième étape A1 a pour but d'identifier les risques majeurs de l'équipement critique appelé MIMAH. Quant à la troisième c'est la méthode MIRAS qui va identifier les scénarios d'accident de référence.

✓ **Etape A0 : sélection des équipements critiques**

La sélection des équipements critiques de l'unité LRB est passée par une première sous-étape de collecte d'informations concernant le procédé, les équipements, les conditions opératoires, la nature et la quantité des substances mises en jeu.

Les équipements présélectionnés sont seulement ceux contenant des substances dangereuses ; ils sont classés selon 16 catégories conformément à la directive Seveso 2. Ils passent ensuite par la sélection suivante proposée par ARAMIS :

- S'ils contiennent une quantité suffisante définie dans le Tableau 3-6 en fonction des phrases de risque et la phase de produits dangereux.
- Si la distance entre l'équipement et l'équipement critique est inférieure à 50 m.

- Identification des équipements potentiellement dangereux :

Nous avons fait un inventaire des produits dangereux existants sur le site (LRB). Dans le but de sélectionner les équipements potentiellement critiques. Cela dépend de la phrase de risque de la substance associée. Nous avons ensuite classé les équipements selon la méthode ARAMIS (annexe 2). Les résultats sont résumés dans le tableau 3-5 suivant :

Tableau 3-5: Equipements potentiellement dangereux.

Substance dangereuse	Phrase de risque	Équipement potentiellement critiques	Type de l'équipement	Phase de la substance
Oxygène	R8	Canalisation	EQ10	Gaz
Kérosène	R10/R38/R65/R5/R51/53	Citerne	EQ6	Liquide
Gaz naturel	R12	Four	EQ14	Gaz
		Canalisation	EQ10	Gaz
Biocide T6000	R51/53 R43 R34	circuit LRB CTI-CTII-CTII	EQ10	liquide

✓ **Identification des équipements critiques**

Le principe de la sélection des équipements critiques est le suivant :

- Un équipement qui contient une substance dangereuse va être sélectionné comme un équipement critique si la quantité de la matière dangereuse dans ce dernier est supérieure ou égale à la masse de référence **Ma** (Tableau 3-6),

- La valeur seuil dépend des propriétés dangereuses de la substance, la phase, la tendance de sa vapeur et éventuellement sa position par rapport à un autre équipement critique (effet domino).

Pour définir la valeur du seuil qui sert de comparaison avec la quantité de référence, une première quantité **Ma** est définie en fonction des caractéristiques des produits. Celle-ci est corrigée pour les liquides dont l'évaporation conduit à une aggravation des risques. Cela nécessite la définition de la quantité seuil **Mb**, la masse **Ma** précédemment définie doit être divisée par un facteur correctif **S** (Eq 3-1).

ou

$$M_b = M_a / S$$

Eq 3-1

Tableau 3-6: Masse de référence selon la nature des substances

Propriété des substances	MASSE DE REFERENCE MA (KG)		
	Solide	Liquide	Gaz
1. Très toxique	10000	1000	100
2. Toxique	100000	10000	1000
3. Oxydant	10000	10000	10000
4. Explosive (Définition 2a annexe 1 Directive Seveso II)	10000	10000	-
5. Explosive (Définition 2b annexe 1 Directive Seveso II)	1000	1000	-
6. Inflammable	-	10000	-
7. Très inflammable	-	10000	-
8. Extrêmement inflammable	-	10000	1000
9. Dangereux pour l'environnement	10000	10000	1000
10. Autres classification que celle ci-dessus impliquant des phrases de risques R14, R14/15, R29	10000	10000	-

Le coefficient **S** est la somme de deux coefficients **S1** et **S2**.

Où

$$\boxed{S = S_1 + S_2}$$

Eq 3-2

S remplit les conditions suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} 0.1 < S < 10 \\ \text{Si } S < 0.1 \text{ alors } S = 0.1 \\ \text{Si } S > 10 \text{ alors } S = 10 \end{array} \right\}$$

Les coefficients **S1** et **S2** se calculent ainsi :

Le coefficient **S1** est lié à la différence entre la température de service **Tp** (°C) et la température d'ébullition à pression atmosphérique **Teb** (°C):

$$\boxed{S_1 = 10^{\frac{T_p - T_{eb}}{100}}}$$

Eq 3-3

Le coefficient **S2** ne s'applique que lorsque la température de service est inférieure à 0°C:

$$\boxed{S_2 = \frac{T_{eb}}{-50}}$$

Eq 3-4

En cas de température de service positive : **S2** = 0

Une première sélection d'équipements est alors réalisée : les équipements dont la masse de produit dangereux est supérieure à la masse seuil **Ma** ou **Mb** sont sélectionnés.

Remarque : pour les équipements de transport on calcule la quantité qui passe par l'équipement pendant 10 min.

✓ Application numérique

Le Tableau 3-7 résume les résultats des calculs pour tous les équipements potentiellement critiques.

Canalisation à Oxygène (O2)

Données : un débit de 10000 m³/h, la masse volumique de l'oxygène $\rho_V = 1,4276 \text{ Kg/m}^3$

- Pour les canalisations on calcule le volume (**V_{O2}**) pour une période de t où t=10 min:

$$V_{O_2} = 10000 \times 10 / 60 = 1666,6 \text{ m}^3$$

- Pour convertir le volume en masse, nous multiplions le volume par la masse volumique ρ_V

Donc la masse de l'oxygène m dans cet équipement est égale à :

$$m = 1.4276 \times 1666.6 = 2379,33 \text{ Kg}$$

La masse de référence : $M_a = 10000 \text{ Kg}$ selon le tableau 3-6 Résultat :

Résultat : La masse de l'oxygène dans la canalisation à oxygène m est inférieure à la masse de référence M_a ($M_a = 10000 \text{ Kg} > m = 2376.33 \text{ Kg}$) donc elle n'est pas sélectionnée comme un équipement critique.

Citerne de kérosène

Données : volume $V = 9000 \text{ L}$, $T_{\text{service}} = T_{\text{ambiante}} = 25^\circ \text{c}$, $P_{\text{service}} = P_{\text{atm}}$, $T_{\text{éb}} = 150^\circ \text{c}$

Masse volumique $\rho_V = 0.8 \text{ Kg/L}$

Alors la Masse de kérosène m est égale à :

$$m = V \times \rho_V = 0.8 \times 9000 = 7200 \text{ Kg}$$

Et la Masse de référence $M_a = 10000 \text{ Kg}$ inflammable

- Comme la FDS du kérosène le définit comme une substance ayant la propriété d'un liquide dont l'évaporation conduit à une aggravation des risques, donc il faut calculer le facteur S

$$\text{Où} \quad S = S_1 + S_2$$

Et comme la température de service est supérieur à 0°c donc $S_2 = 0$

$$\text{Alors} \quad S = S_1 = 10^{\frac{T_p - T_{eb}}{100}} = 10^{\frac{25 - 150}{100}} = 0.0562$$

$$\Rightarrow S = 0.0562$$

Selon les conditions de S , si $S < 0.1$ alors $S = 0.1$

$$\text{Donc} \quad M_b = M_a / S = 10000 / 0.1 = 100000 \text{ Kg}$$

$$\Rightarrow M_b = 100000 \text{ Kg}$$

Résultat : la masse seuil M_b est plus grande que la masse de la substance contenue dans l'équipement « citerne de kérosène » ($m = 7200 \text{ Kg}$) donc cet équipement n'est pas critique.

Four

Données : Longueur : $l=18.7$ m, largeur : $L= 18.2$ m , hauteur : $H= 7.5$;

$$\rho_V(\text{gaz})= 0.7 \text{ Kg/m}^3$$

$$\text{Volume du four : } V=l \times L \times H = 1795.2 \text{ m}^3$$

La masse de gaz m dans le four égale à :

$$m= 1795.2 \times 0.7 = 1256.64 \text{ Kg}$$

$$M_a = 1000 \text{ Kg}$$

Résultat : La masse de gaz à l'intérieur du four ($m=1256.64 \text{ m}^3$) est supérieure à la masse seuil ($M_a = 1000 \text{ Kg}$) donc le four est un équipement critique

Canalisation à gaz

Données : Débit = $1000 \text{ m}^3/\text{h}$ et $\rho_V(\text{gaz})= 0.7 \text{ Kg/m}^3$, $M_a=1000 \text{ Kg/h}$

- Pour les canalisations on calcule le volume (V_{gaz}) pour une période de t ou $t=10$ min:

$$V_{\text{gaz}}=1000 \times 10/60 = 166,6 \text{ m}^3$$

$$\text{La masse du gaz : } m= V_{\text{gaz}} \times \rho_V(\text{gaz})=166.6 \times 0.7= 116.62 \text{ Kg}$$

Résultat : La masse du gaz qui passe dans La canalisation à gaz (pendant 10 min) m est inférieure à la masse de référence M_a ($M_a = 1000 \text{ Kg} > m= 116.62 \text{ Kg}$) donc il n'est pas sélectionné comme un équipement critique.

Circuit LRB CTI-CTII-CTII de biocide

Données : Masse $m=1000 \text{ Kg}$, $M_a=10000 \text{ Kg}$

$$S= S1=10^{\frac{T_p-T_{eb}}{100}} = 10^{\frac{24-100}{100}} = 0.23$$

$$M_b=10000/0.23=43478.86$$

Résultats : La masse de biocide dans l'équipement est inférieure à la masse seuil M_b ($m < M_b$) => ce n'est pas un équipement critique.

Résultats et interprétation

L'équipement critique de l'unité LRB qui peut engendrer un accident majeur selon l'étape A0 de l'opération A d' ARAMIS est **le four**. Ce résultat est obtenu quantitativement, et il est compatible avec le résultat de la méthode qualitative utilisée précédemment (APR).

Tableau 3-7 : Résultats des calculs de l'étape A0

Équipement	Type	Substance	Phase	Tp (°c)	Teb (°c)	P bar	Quantité (kg)	M a (Kg)	S1	S2	S	Mb (Kg)	1 ^{ère} sélection
Canalisation à oxygène	EQ10	Oxygène (d=1,1)	Gaz	T ambiante	-183	5	2379,33	10000	0	0	0	/	non
Citerne de kérosène	EQ6	kérosène	Liquide	T ambiante	150	Patm	7200	10000	0,05	0	0,1	100000	non
Four	EQ14	Gaz naturel	Gaz	1130	-159	0,08	1256.64	1000	0	0	0	/	oui
Canalisation à gaz	EQ10	Gaz naturel	Gaz	T ambiante	-159	8-10	116.62	1000	0	0	0	/	non
circuit LRB CTI-CTII-CTII	EQ10	Biocide T6000	Liquide	24 - 37	100	4 à 5	1000 kg	10000	0,23	0	0,23	43478.86	non

✓ **Opération A1 : Méthode MIMAH (*Méthodologie for the Identification of Major Accident Hazard*)**

La méthode MIMAH a pour objectif d'aider à une identification la plus exhaustive possible des accidents qui pourraient survenir sur un site. Pour ce faire, elle considère de façon systématique, pour chacun des équipements critiques identifiés dans l'étape A0, l'ensemble des événements physiquement envisageables en négligeant l'action d'éventuelles barrières de sécurité. L'objectif est d'abord de définir un ensemble complet de scénarios parmi lesquels les plus catastrophiques. ARAMIS adopte une liste de 12 événements redoutés centraux ERC.

MIMAH est fondée sur l'élaboration de diagrammes en nœud papillon. Pour chaque équipement est associé un ensemble (ERC). Pour chaque ERC, un arbre des défaillances est élaboré, puis un arbre des événements.

MIMAH est composée de 3 étapes principales (A1a, A1b, A1c) illustrées sur la figure 3.

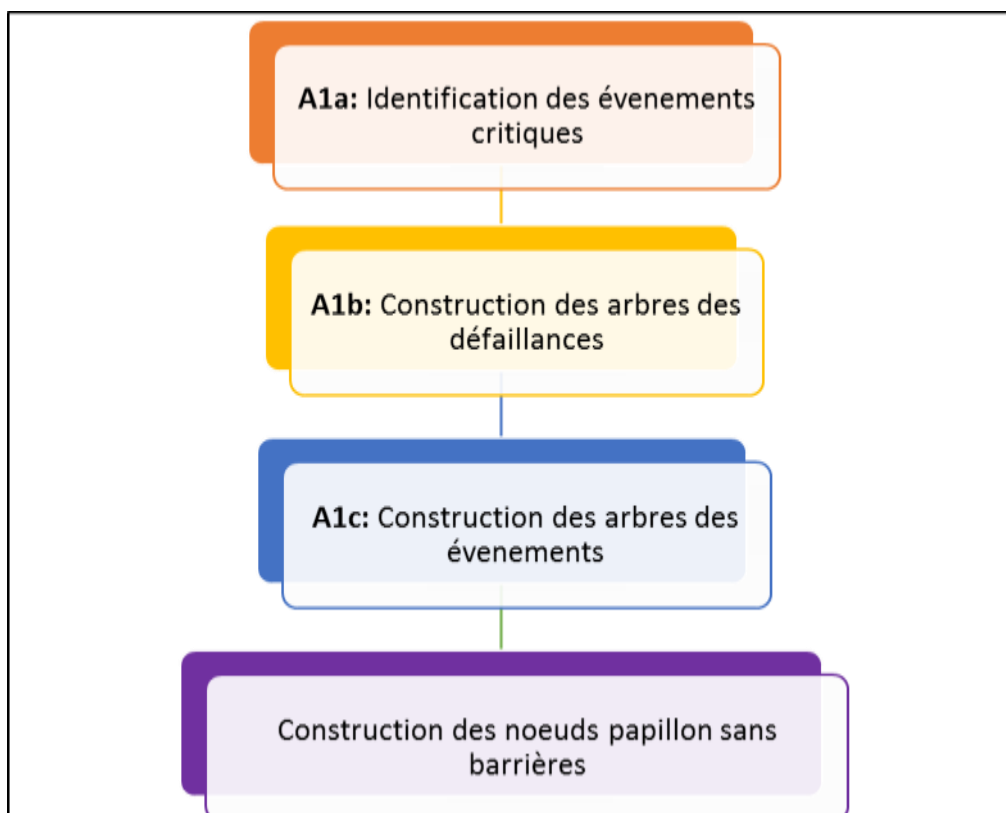


Figure 3-4 : Les étapes de la méthode MIMAH

Etape A1a : Identification par équipement les évènements Redouté Centraux :

A partir de la typologie de l'équipement déjà spécifié dans l'étape A0 Tableau 1, et selon la phase de la substance dans cette équipement sont identifiés les évènements redoutés centraux ERC potentiels (La liste d'évènements critiques possibles ou ERC est spécifiée dans le Tableau 7). Cette étape s'appuie sur l'expertise des exploitants et l'utilisation des deux matrices suivante :

- Une matrice croisant le type d'équipement avec les 12 évènements critiques potentiels (Tableau 3-8).
- Une matrice croisant les évènements critiques avec l'état physique des substances (Tableau 3-9)

Pour notre cas : l'équipement critique four de type EQ14 (équipement de fourniture d'énergie) et la substance est en phase gazeuse.

Tableau 3-8: Partie de la matrice croisant le type d'équipement avec les 12 évènements critiques potentiels

Type d'équipement	ERC1 : Décomposition	ERC2 : Explosion	ERC3 : Mise en mouvement (entraînement par l'air)	ERC4 : Mise en mouvement (entraînement par un liquide)	ERC5 : Inflammation – départ de feu	ERC6 ; Brèche en phase gaz	ERC7 : Brèche en phase liquide	canalisation en phase liquide	ERC9 : Fuite sur canalisation en phase gaz	ERC10 : Rupture catastrophique	ERC11 : Effondrement de réservoir	ERC12 : Effondrement du toit de réservoir
EQ14					X	X	X	X	X	X		

Tableau 3-9: Partie de la matrice croisant les évènements critiques avec l'état physique des substances

Phase de la substance	ERC1 : Décomposition	ERC2 : Explosion	ERC3 : Mise en mouvement (entraînement par l'air)	ERC4 : Mise en mouvement (entraînement par un liquide)	ERC5 : Inflammation – départ de feu	ERC6 ; Brèche en phase gaz	ERC7 : Brèche en phase liquide	ERC8 : Fuite sur canalisation en phase liquide	ERC9 : Fuite sur canalisation en phase gaz	ERC10 : Rupture catastrophique	ERC11 : Effondrement de réservoir	ERC12 : Effondrement du toit de réservoir
Gaz-vapeur					X	X			X	X		

Donc les ERC retenues à partir des matrices d'ARAMIS et selon l'expertise du service exploitation de l'unité LRB sont :

- ERC 6 : Brèche en phase gazeuse
- ERC 9 : Fuite sur canalisation en phase gaz

Etape A1b : Elaboration des arbres de défaillances pour chaque ERC :

MIMAH propose des arbres de défaillances génériques (annexe 3 du D1C [13]) pour chaque évènement redouté centrale (ERC) définis précédemment. Pour ERC 6 et 9 nous avons identifié pour l'équipement four, trois arbres de défaillance basés sur les arbres génériques et le retour d'expérience de l'unité.

En premier lieu, nous avons élaboré une analyse fonctionnelle et structurelle de l'équipement four avant d'élaborer les arbres des défaillances pour mieux comprendre les défaillances de ces sous-systèmes.

- Analyse Structurelle du système

Nom : Four de réchauffage pour billettes

Type : A sole mobile (à longerons réfractaires).

Description

Dans ce type de fours, à chauffage exclusivement supérieur, la sole est découpée en tranches longitudinales fixes (banquettes fixes) et mobiles (longerons). Les produits reposent sur la sole et sont transportés le long du four par le mouvement rectangulaire des longerons (Figure 3-7).

L'étanchéité longerons-four est assurée par des joints hydrauliques (des jupes fixées aux longerons plongent dans des bacs à eau solidaires des banquettes).

Les mouvements verticaux sont obtenus par déplacement d'un châssis sur des plans inclinés, ou par un système de leviers actionnés par des vérins, hydrauliques. Les mouvements horizontaux sont produits par des vérins hydrauliques à course variable, ce qui permet d'adapter le pas des longerons à la largeur des produits enfournés. L'écart entre produits permet de chauffer les trois faces de billettes.



Figure 3-5 : Vue latérale gauche des brûleurs de la zone I et II (source exclusive)

Les produits lourds sont enfournés et défournés frontalement par des machines à bras. Les billettes sont chargées et déchargées latéralement par des rouleaux. Les brûleurs sont groupés dans des zones de chauffage, contrôlées indépendamment les unes des autres. Le nombre de zones est quatre afin de disposer d'un maximum de flexibilité dans la distribution des flux thermiques à transmettre aux produits. À la sortie du four les fumées traversent des récupérateurs, pour préchauffer l'air de tête et d'être évacuées par un cheminée, avec un tirage forcé [3].

- Structure

Le four est subdivisé en quatre zones de combustion avec des brûleurs installés sur les parois latérales et frontale (Figures 3-5 et 3-6) de défournement, soit une zone I de préchauffage, une zone II de réchauffage et zone III et IV de normalisation. Le défournement est effectué latéralement à l'aide d'une machine de défournement et un rouleau pinceur.

Les gaz de combustion (fumées) sont évacués à l'aide d'un circuit de fumée équipé d'un extracteur électrique vers une cheminée réalisés en métal et revêtus de réfractaire à l'intérieur.



Figure 3-6 : Vue frontale des brûleurs de la zone III et IV (source exclusive)

Just à la sortie des fumées du four, est installé un récupérateur de chaleur pour le préchauffage de l'air de combustion. L'air de combustion est aspiré par un ventilateur électrique.

Le four est équipé d'un système de régulation de la température de commande et de protection des auxiliaires du four, d'un système informatisé de supervision du four et d'une série d'automatismes qui en permettent une gestion sûre et facile.

- Description des parties principales

a. Grilles de chargement

Les billettes sont prises du stock à l'aide d'un pont roulant et soulevées en couches uniques de 6 billettes maximum; ensuite, elles sont placées sur des grilles d'alimentation envisageant un espace suffisant pour quatre soulèvements, et elles sont avancées par des doigts oscillants qui engagent les billettes dans la course avant.

A la fin des grilles de chargement, les billettes seront transférées, une à la fois, sur le transporteur à rouleaux. Un système à photopiles, installé sur le châssis de la table à rouleaux, détecte la présence des billettes sur le rouleau.

Les deux chariots de la grille sont actionnés par des cylindres oléo dynamiques contrôlés par des contacts de fin de course.

b. Transporteur à rouleaux

Le transporteur de chargement transporte une billette à la fois; il se compose de rouleaux actionnés individuellement. Il peut être actionné en sens contraire de façon à permettre le déroulement inverse des billettes. Il peut fonctionner sans dommages avec seulement deux

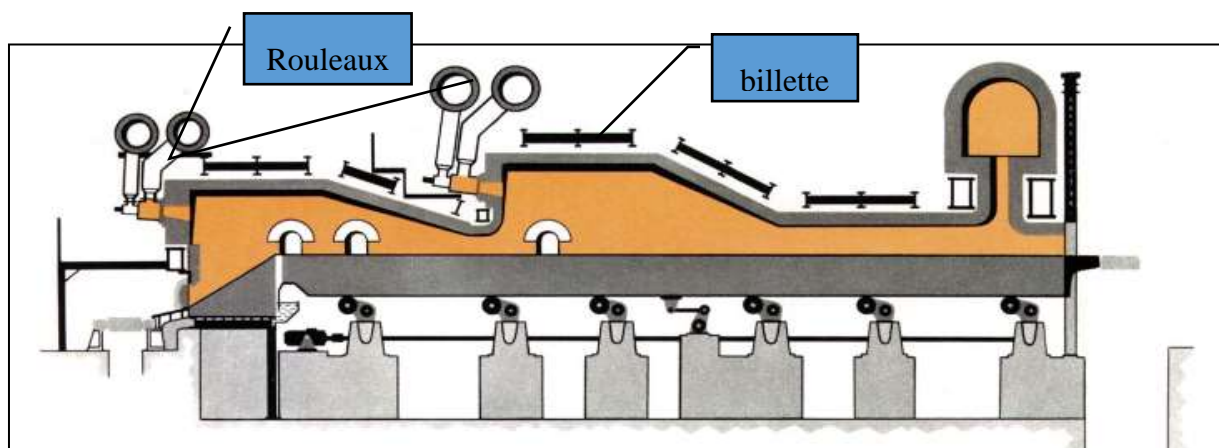


Figure 3-7 : Le sol mobile du four [2]

connexions de rouleau pour chaque billette.

L'espace entre les rouleaux favorise un fonctionnement uniforme.

Un système de pesée est installé devant la grille de chargement. Il est équipé de cabines de balance et il est connecté au PLC et PC du four par des dispositifs électroniques spéciaux.

Le transporteur à rouleaux est équipé de tampons élastiques, installés sur les côtés.

c. Système de chargement

Il est composé de deux cylindres identiques, indépendants et synchronisés hydrauliquement, qui poussent la billette hors des rouleaux dans le four.

d. Machine de déchargement

Elle est composée d'un chariot qui roule sur des rails dotés d'un bras refroidi à l'eau, qui se prête bien à entrer dans la chambre du four et à pousser la billette prête à être déchargée. Le bras et le chariot sont poussés par deux rouleaux, chacun raccordé à un moteur à engrenage oléo dynamique.

Le système de l'eau de refroidissement est équipé de flexibles, soupapes de réglage, un pressostat et un débitmètre.

La position du bras de poussage ou mieux la position de la machine transversale et la course du bras sont contrôlés par des contacts de fin de course et par un codeur raccordé au P.L.C. du système de manutention.

e. Détecteur de billettes

Un détecteur de billettes sera installé sur la tête antérieure du four afin d'arrêter, à l'aide de bras spéciaux, la machine de chargement quand la billette qui doit être déchargée se trouve dans la position correcte et afin de détecter sa position à l'intérieur du four.

Le bras, refroidi par l'eau, est poussé par un cylindre pneumatique et raccordé aux contacts de fin de course et au codeur qui transmet les signaux correspondants au P.L.C. du système de manutention

f. Poste de commande de la pression du gaz naturel

La pression du gaz naturel est réduite de la pression de la ligne d'usine (de 8 à 10 bars) jusqu'à la pression de décharge du four (80 mbar) et gardée constante sur cette valeur.

g. Brûleurs principaux

Les brûleurs à flamme haute, appropriés pour les utilisations futures du mazout, fonctionnent avec de l'air à combustion chaude et sont installés sur les parois du four (figure 3-8).

Ils sont divisés en plusieurs zones de contrôle de rapport et de température, selon le profil du four et la courbe de réchauffement, afin de permettre un fonctionnement uniforme en toute sécurité. Chaque brûleur est doté d'une vanne manuelle de l'air de combustion, de filtres de mazout et d'air d'atomisation, de robinets, de tuyaux, et de raccords de dilatation métalliques pour l'air chaud.

Les zones de réchauffage sont équipées de brûleurs avec un rapport élevé entre débit maximal et minimal (double flamme) afin de garantir une bonne uniformité de température à travers la coupe transversale de la chambre du four, indépendamment du taux thermique du four.

Les brûleurs à double flamme sont alimentés à travers deux vannes de réglage de l'air de combustion pour chaque zone. Avec un taux thermique jusqu'à 30%, seulement la vanne de réglage à capacité réduite est mise en fonction, et la vanne de réglage à haute capacité est fermée.

Cette vanne est actionnée même à des taux plus hauts, et la vanne de réglage à capacité réduite est complètement ouverte. De cette façon la pression d'air dans la buse du brûleur et, donc, l'intensité de la flamme est toujours très élevée.



Figure 3-9 : Brûleurs à double flamme (source exclusive)



Figure 3-8 : Brûleur de la zone II de réchauffage (source exclusive)

h. Veilleuse (brûleur pilote)

Les brûleurs des zones d'égalisation et de la zone de pré réchauffage sont équipés d'une veilleuse à gaz, pour l'allumage automatique, et d'un système de détection de la flamme avec photocellules UV.

En ce qui concerne les brûleurs de ces zones, la fourniture inclut:

- une veilleuse complète de mélangeur, régulateur de pression
- une barre de détection de la flamme de la veilleuse
- un transformateur à haut voltage avec bougie d'allumage
- une électrovanne d'arrêt de la veilleuse
- un relais de détection de la flamme (photocellule)

Des dispositifs de contrôle et de signalisation de la flamme, ainsi que d'allumage, sont assemblés sur les panneaux de commande locale.

Pour assurer la sécurité de la flamme en n'importe quel moment, un système automatique de valves d'arrêt imperméable au gaz est installées sur le collecteur de gaz de la zone de réchauffage (non doté de pilotes); ces vannes sont contrôlées par la température de la zone correspondante et sont fermées automatiquement si la température descend au-dessous de 800°C.

L'allumage du four se déroule de cette façon:

- allumage des veilleuses du pupitre principal ou du pupitre de contrôle du brûleur local
- ouverture automatique de l'électrovanne à gaz du brûleur principal quand le relais détecte la flamme de la veilleuse relative
- ouverture automatique des valves d'arrêt principales de la zone de réchauffage, quand la température respective dépasse 800°C.

i. Ventilateur de l'air de combustion

L'air de combustion est fourni par un ventilateur centrifuge, avec une tête suffisante à alimenter les brûleurs à une pression de 250 à 300 daPa.

Le ventilateur est équipé de vanne d'aspiration à secteurs, poussée par un actionneur pneumatique, pour garder constante la valeur de la pression de l'air de pré réchauffage amont des tôles à orifice de mesure calibrée et les vannes de réglages du flux.

j. Ventilateur pour équipement auxiliaire

Un ventilateur centrifuge fournit l'air pour le refroidissement des photocellules et de l'appareil de prise de vues électronique.

Le ventilateur sera équipé d'une vanne papillon manuelle, pour contrôler la vitesse d'écoulement de l'air.

k. Récupérateur de chaleur

Un récupérateur à faisceau tubulaire convectif est installé dans le tuyau d'évacuation thermique horizontal et est mis au point pour préchauffer l'air de combustion jusqu'à 450°C approximativement.

Le récupérateur de chaleur est protégé de cette façon:

- Contre les hautes températures du gaz de combustion, à travers un ventilateur centrifuge, qui souffle air frais dans le tuyau d'évacuation, à travers une entrée spéciale qui se trouve amont du récupérateur, pour refroidir la fumée. Ce ventilateur est équipé d'une vanne à papillon d'arrêt.
- Contre la surchauffe de l'air de combustion, à l'aide d'une vanne papillon de dégagement, installée sur le collecteur d'air chaud (en aval du récupérateur) et actionnée par un actionneur électrique.

l. Tuyau d'évacuation du gaz

Les fumées sont cueillies à la sortie du four, grâce à des conduites verticales, dans un collecteur horizontal situé au-dessous du four, dans la zone de chargement. De là le récupérateur les transporte vers la cheminée.

m. Ventilateur de dilution

Un ventilateur centrifuge fournit l'air pour réchauffer la fumée en amont du récupérateur. Le ventilateur est équipé d'une vanne à papillon d'arrêt. Il est installé près du ventilateur de l'air de combustion, dans le même endroit isolé contre le bruit.

n. Vanne de contrôle de la pression du four

Une soupape de contrôle de la pression du four est installée dans la conduite de la fumée en aval du récupérateur d'air de combustion. Il est composé d'un disque soudé à un maître arbre vertical refroidi par l'eau, qui est supporté par un roulement supérieur et qui est libre de dilater au-dessous. L'amortisseur est activé par un actionneur pneumatique.

o. Exhausteur (expirateur)

Le tirage, nécessaire pour compenser les chutes de pression à travers le circuit d'exhalation, est assuré par un ventilateur centrifuge, installé amont de la cheminée.

Il est actionné par un moteur asynchrone, contrôlé par un inverseur, pour augmenter le tirage jusqu'à l'entrée de combustible réelle (par exemple jusqu'à la chute de pression réelle). Cela a le but d'épargner de l'énergie électrique et d'effectuer le meilleur contrôle de la pression du four.

p. Cheminée

Les décharges sont dégagées dans l'atmosphère à travers une cheminée d'une hauteur de 30m. Il s'agit de secteurs cylindriques fixés par bride, constitués de tôles soudées en acier doux, et isolées.

- Analyse fonctionnelle

Nous avons élaboré une analyse fonctionnelle du système Four selon le manuel opératoire fourni par le constructeur Italien BENDOTTI.

Les sous-systèmes (ss) développés dans cette analyse sont ceux qui contiennent du gaz (substance dangereuse) :

- SS1 : circuit gaz

- SS2 : circuit d'air et gaz des brûleurs pilotes.

Tableau 3-10: Analyse fonctionnelle du système four

Système	Sous système (SS)	Équipement (E)	Composant (C)	Fonction
Four	SS.1. Circuit gaz	E.1.1. Poste de détente	C 1.1: Vanne générale manuelle	Inhiber le passage du gaz lorsque le four est éteint,
			C 1.2: pressostat <7Bar	Fermer la vanne électrique lié au réducteur « 1 » si la pression < 7bar
			C 1.3: Filtre à cartouche	Éliminer les impuretés venant avec le gaz
			C 1.4: Réducteur 1	Diminuer la pression de la valeur de ligne (8-10 Bar) à 4 Bar
			C 1.5: Réducteur 2	Diminuer la pression de 4 Bar à la valeur de régime (80 mbar)
			C 1.6: deux pressostats	Régler la valeur limite : l'une en dessous de la valeur de régime, l'autre en dessus de la valeur de régime
			C 1.7: vannes de sûreté et purge	Echapper la pression élevée dans la tuyauterie de purge + évacuation du gaz de la conduite pour intervenir
		E1.2. Zones III et IV de conditionnement et zone I de Préchauffage	C2.1: Vanne manuelle	Fermer et ouvrir la ligne lorsque le four est éteint,
			C 2.2: Chicane de mesure	Mesurer le débit
			C 2.3: Vanne papillon et servomoteur	Contrôler la vitesse d'écoulement
			C 2.4: Vanne manuelle de la purge	Blocage extrême pour l'échappement du gaz
			C 2.5: deux Electrovanes en série de sûreté des brûleurs	Contrôler le débit d'entrée bruleur
			C 2.6: Bruleurs avec une vanne manuelle (contient un bruleur pilote)	Assurer une température donnée par une flamme régler en débit d'air et de gaz
		E.1.3. zone II de réchauffement (quand la température interne du four	C 3.1: deux soupapes pneumatiques	Régulation de débit gaz
			C 3.2: pressostat	Détection de la pression pour le test d'étanchéité pour p<40 mbar
			C 3.3: électrovanne de	Echapper la pression élevée

		atteint et gade 800°c (ou plus), il est possible d'allumer cette zone)	sécurité	dans la tuyauterie
			C 3.4: électrovanne de remplissage	Contrôler la quantité du gaz lors du test d'étanchéité
			C 3.5: chicane de mesure	Mesurer le débit
			C 3.6: Vanne papillon et servomoteur	Contrôler la vitesse d'écoulement
			C 3.7: Bruleurs avec une vanne manuelle	Assurer une température donnée par une flamme régler par les soupapes pneumatique
SS2. Circuit de l'air et du gaz pour les 18 bruleurs pilotes	E.2.1 bruleur pilote		C.1.1 : Veilleuse	Créer une étincelle
			C.1.2 : Photocellule	Détecter les rayons IR pour la présence de la flamme
			C.1.3: deux électrovannes	Régulation du débit gaz
			C.1.4 : Détecteur de flamme	Convertir le signale IR en signale électrique pour actionner les électrovannes du bruleur principale

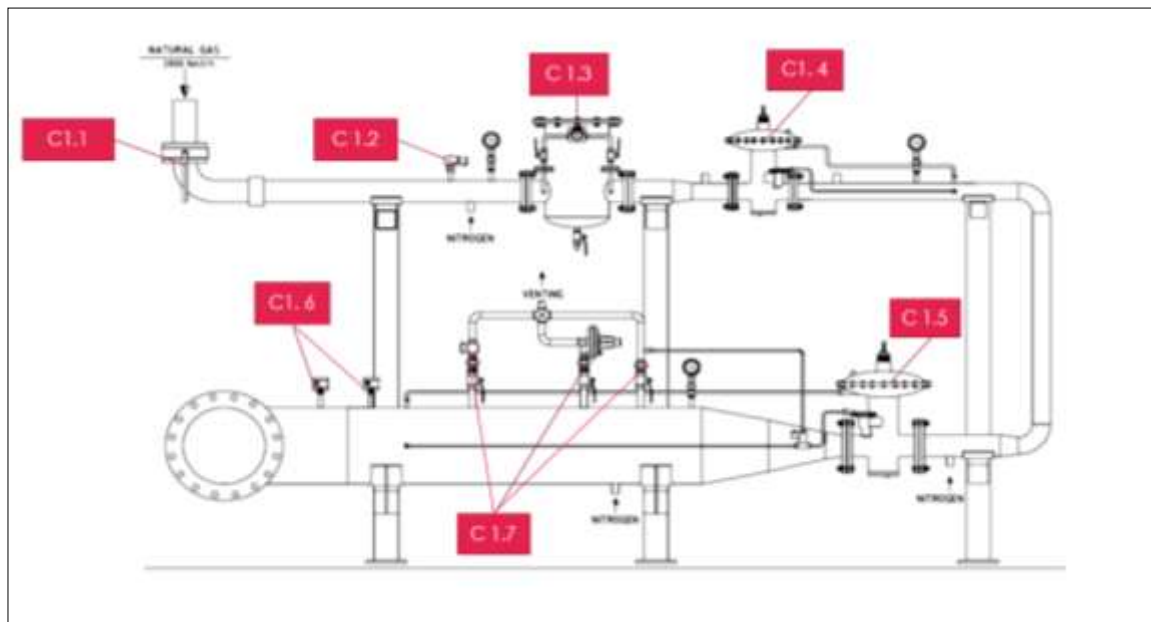


Figure 3-10: Schéma de l'équipement E1.1 : Poste de détente avec ses composants (source ARCELORMITTAL)

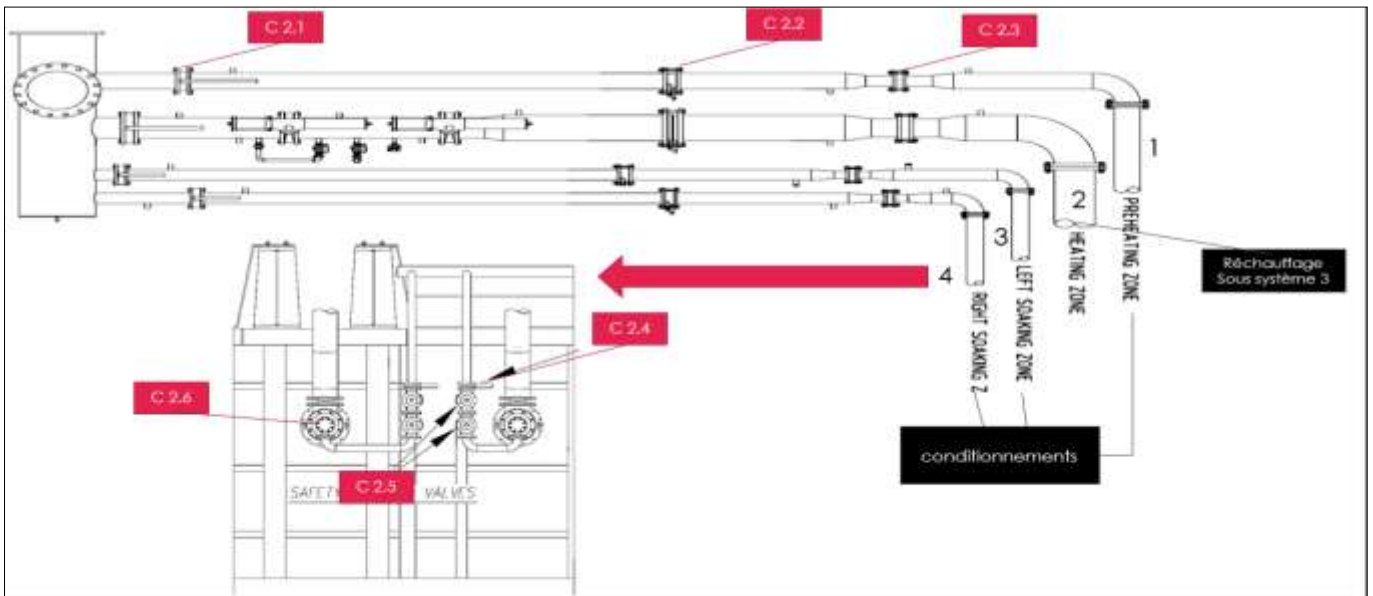


Figure 3-11: Schéma de l'équipement E.1.2 Zones III et IV de conditionnement et zone I de Préchauffage avec ses composants (source ARCELORMITTAL)

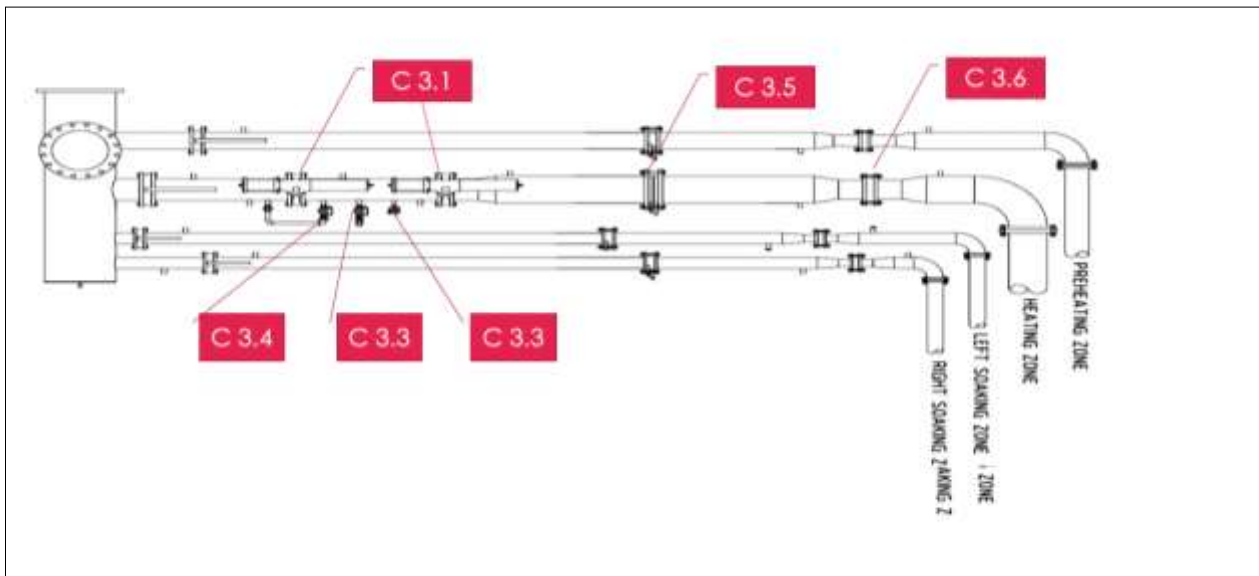


Figure 3-12: Schéma de l'équipement E.1.3 zone de réchauffe avec ses composants (source ARCELORMITTAL)

✓ Définition des causes

La définition du fonctionnement des différents composants du four nous permet de définir les causes des dysfonctionnements. La méthode ARAMIS propose trois arbres de défaillance selon des valeurs type de diamètre de brèches et de fuites,

Tableau 3-11: Valeurs types de brèches et de diamètres de fuite selon ARAMIS [14]

Type de brèche ou fuite	ERC6 et ERC7 : diamètres de brèches	ERC8 et ERC9 : diamètres de fuite
Large	100 mm	Rupture guillotine
Moyenne	35 à 50 mm ou diamètre de l'équipement (vannes..)	22 à 44 % du diamètre de canalisation
Petite	10 mm	10% du diamètre de canalisation

- Les causes identifiées dans MIMAH sont des causes génériques. Nous avons pu les compléter sur site avec les exploitants du four, au cours de notre démarche d'analyse des risques. Les arbres génériques sont conçus comme des supports pour assurer un maximum d'exhaustivité dans la recherche des causes. Quatre niveaux de causes sont définis, qu'il faut adapter à la complexité de l'analyse des risques. Dans notre cas, nous avons envisagé des branches spécifiques sur l'arbre à certaines phases de l'installation : le démarrage et le fonctionnement, car d'après l'étude de danger et l'historique des accidents des fours, la phase de démarrage est la plus critique.

L'identification des arbres génériques a été faite en identifiant successivement :

1. Les conditions nécessaires et suffisantes pouvant conduire aux pertes de confinement ou d'intégrité physique envisagées. Ces conditions sont généralement physiques. Par exemple, dans le cas d'un incendie, il est nécessaire d'avoir à la fois un produit combustible, une source d'inflammation et un produit comburant.
2. Les causes directes dont découlent les conditions nécessaires et suffisantes. Ces causes directes peuvent être regroupées en catégories génériques ;
3. Chacune des causes directes peut à son tour être détaillée. Par exemple une montée en pression peut être due à un sur-remplissage ou à une agression thermique.
4. Enfin, un dernier niveau, les événements indésirables, a été établi en recherchant les événements pouvant conduire aux causes directes détaillées. Ces événements se ramènent souvent à des lacunes en termes d'organisation ou des erreurs humaines. Il a été décidé d'arrêter le développement des arbres à ce niveau qui semble suffisant pour identifier les

principales mesures de sécurité à mettre en œuvre ainsi que l'importance du management dans la maîtrise des accidents majeurs.

Les principes et les hypothèses mis en œuvre dans MIMAH ont été justifiés grâce à un examen des bases d'accidents MARS, MHIDAS et HADES. Il est alors apparu qu'à quelques exceptions, la méthode MIMAH permettait de bien décrire les séquences d'évènements à l'origine d'accidents majeurs.

Pendant cette analyse nous avons corrigé et complété quelques insuffisances selon notre cas.

Les 3 arbres retenus pour les deux scénarios ERC6 et ERC 9 sont donnés en annexe 3.

Étape A1c élaboration des arbres des évènements :

L'objectif de la méthode expliquée ci-après est de construire l'arbre des évènements en se basant sur les trois données suivantes : le type de l'équipement, propriétés dangereuses de la substance, et l'état physique de cette dernière.

Cette étape consiste à identifier pour les ERC associés à un équipement les Evénements Critiques Secondaires (ERS) et cela dépend de l'état physique de la substance traitée : un même événement critique peut donner lieu à différents événements critiques secondaires pour différents états de la substance. Une matrice reliant l'essentiel ERS, l'état de la substance (phase) et les Evénements Critiques Secondaires (SCE) est ainsi construite.

De la même manière, les matrices reliant les Evénements Redoutés Secondaires (ERS) avec les Evénements Redoutés Tertiaire (ERT), et les ERS. Enfin, pour chaque ERT, des phénomènes dangereux (DP) sont définis. La traversée est indépendante de l'état physique de la substance. Les DP identifiés doivent être compatibles avec les propriétés de la substance (dans notre cas : un gaz extrêmement inflammable), sinon ils ne sont pas pris en considération.

Ensuite nous cherchons les types des effets des DP retenus. Les effets des phénomènes dangereux (DP) sont classés en quatre types :

- Effet Thermique
- Effet De Surpression
- Effet Missile
- Effet Toxique

La détermination des effets est basée sur la nature de notre DP d'après les connaissances scientifiques actuelles, et ARAMIS propose une matrice dans ce sens.

Les matrices utilisées pour la construction de l'arbre des évènements sont tirées de l'annexe 5 de DIC [13] et le résultat est présenté dans le Tableau 3-12.

Les porte « et » et « ou » ne sont pas prises en considération dans cette étape mais elles sont identifiées dans l'étape suivante (MIRAS).

La figure 3-13 présente l'arbre des ERC6-9

Tableau 3-12: Définition des éléments de l'arbre des évènements de l'ERC6 et ERC9

ERC : EVENEMENT REDOUTE CENTRAL	ERS : EVENEMENT REDOUTE SECONDAIRE	ERT : EVENEMENT REDOUTE TERTIAIRE	PHD : PHENOMENE DANGEREUX	EST -IL COMPATIBLE AVEC LA PHRASE DE RISQUE	EM : EVENEMENT MAJEUR
ERC : 6 Brèche en phase gaz	ERS : 5 Jet de gaz	ERT : 5 Dispersion de gaz	PhD : 4 VCE	oui	Effet : thermique, pression, missiles
			PhD : 5 Flash fire (feu de flash)	oui	Effet : thermique,
			PhD : 6 Nuage toxique	non	/
			PhD : 11 dommages à l'environnement	non	/
		ERT : 7 Jet de gaz enflammé	PhD : 3 Feu de torche	oui	Effet : thermique,
			PhD : 6 Nuage toxique	non	/
			PhD : 11 dommages à l'environnement	non	/
ERC : 9 Fuite sur canalisation en phase gaz	ERS : 5 Jet de gaz	ERT : 5 Dispersion de gaz	PhD : 4 VCE	oui	Effet : thermique, pression, missiles
			PhD : 5 Flash fire (feu de flash)	oui	Effet : thermique,
			PhD : 6 Nuage toxique	non	/
			PhD : 11 dommages à l'environnement	oui	/
		ERT : 7 Jet de gaz enflammé	PhD : 3 Feu de torche	oui	Effet : thermique,
			PhD : 6 Nuage toxique	non	/
			PhD : 11 dommages à l'environnement	non	/

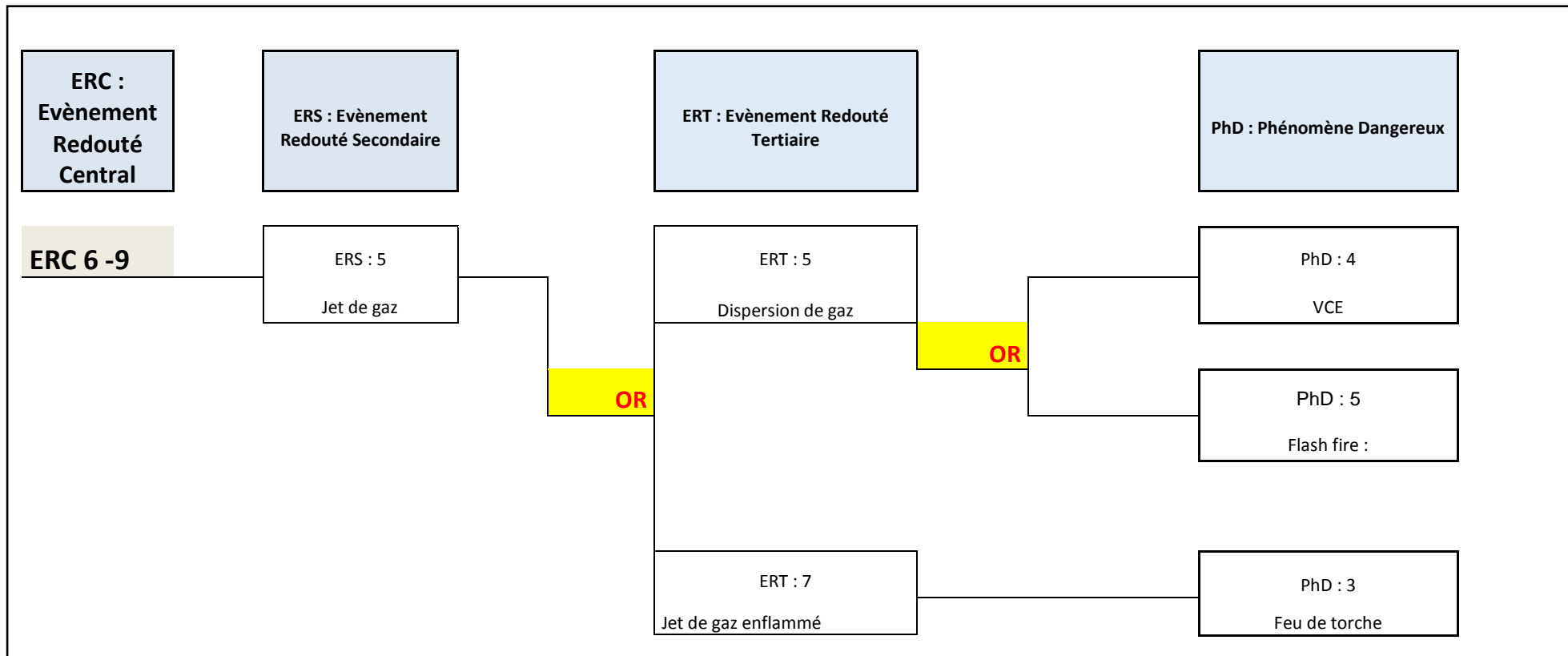


Figure 3-13: Arbre des évènements de l'ERC

✓ **Opération A2 : MIRAS** (*Method for the Identification of Reference Accident Scenarios*)

L'objectif de cette opération est la sélection des scénarios de référence qui seront modélisés et feront l'objet d'une cartographie de la sévérité. Le choix des scénarios de référence s'appuie sur une matrice de risques, qui définit des zones d'acceptabilité en fonction de la fréquence d'occurrence évaluée pour chaque phénomène dangereux identifié.

Le logigramme de la figure 3-14 résume les principales étapes de la méthode MIRAS.

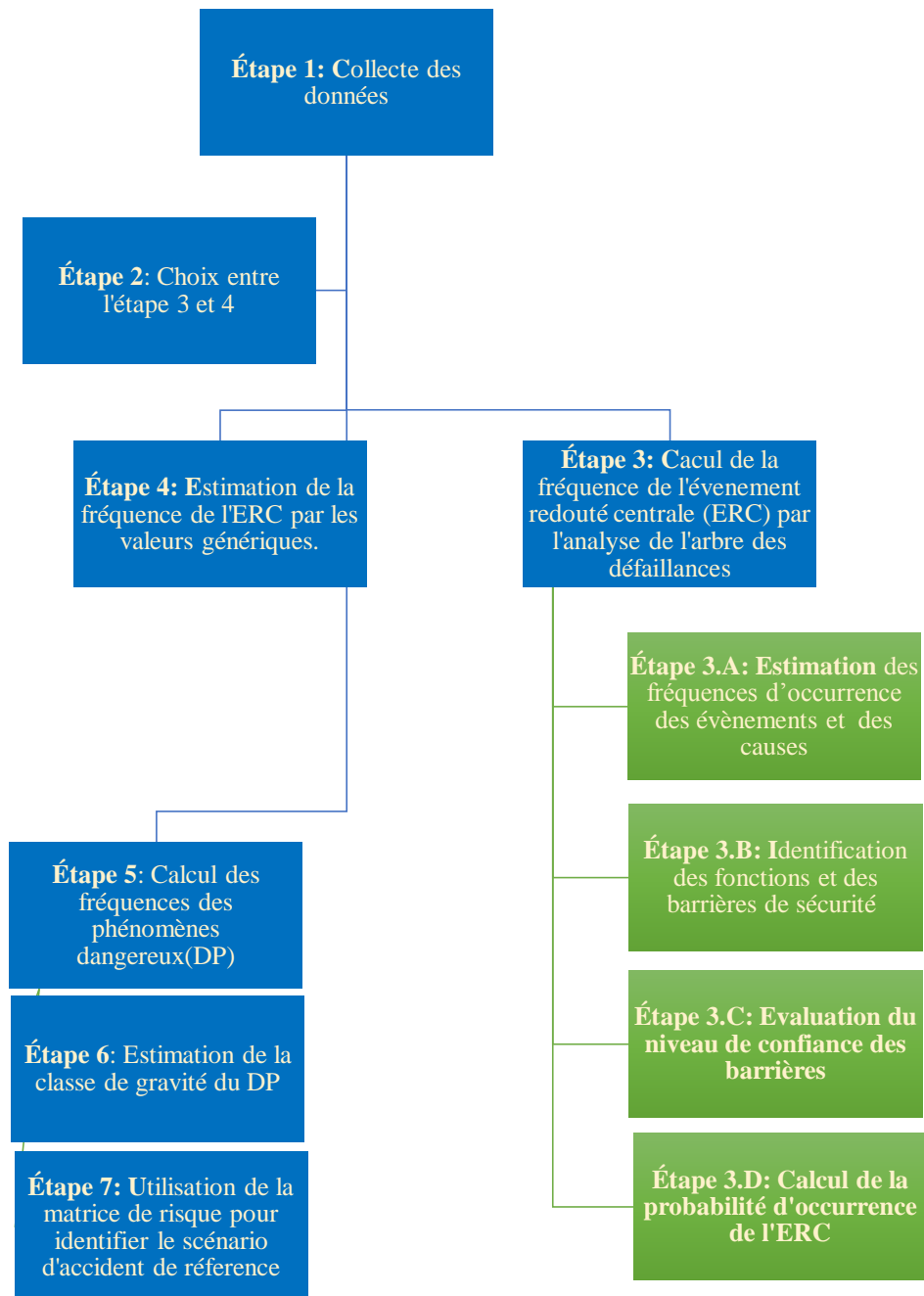


Figure 3-14: Vue générale de la méthode MIRAS

✓ **Etape 1 : Collecte des données**

Le travail avec la méthode MIRAS nécessite une compréhension approfondie du fonctionnement du système et ces différentes parties et une recherche bibliographique dans les banques de données de la fiabilité des systèmes et de la fiabilité des opérations humaines.

ARAMIS propose dans les annexes 7 et 9 du Document D1C [13] plusieurs banques et travaux à consulter pour l'estimation des fréquences d'occurrence des événements et causes et pour l'identification des niveaux de confiance des barrières de sécurité présentées dans les étapes suivantes.

Etape 2: Choix entre l'étape 3 et 4 :

Dans notre cas, nous n'avons pas le choix, car le four (type EQ14 : équipement de fourniture d'énergie) ne possède pas de valeurs génériques dans l'annexe 10 du Document D1C [13] qui présente les données génériques de l'étape 4.

Etape 3.A : Estimation des fréquences d'occurrence des événements et des causes

Les fréquences (ou probabilités) des événements initiateurs doivent être évaluées. L'annexe 7 de D1C [13] donne un aperçu des données disponibles pour les fréquences (ou probabilités) d'événements initiateurs. Cependant, il est recommandé d'utiliser les données spécifiques de l'installation si elles sont disponibles ou de les estimer avec le personnel de l'usine, avec l'aide des fréquences indiquées dans l'échelle qualitative suivante :

Tableau 3-13: Estimation qualitative des fréquences d'occurrence par année

Fréquence d'occurrence par année		Classe
Définition qualitative	Définition quantitative	Symbole
Très bas : impossible	$Fr < 1/10000$ année	F4
Bas : possible et déjà survenue dans des installations similaires	$1/10000$ année $< F \leq 1/1000$ année	F3
Bas : possible et déjà survenue dans des installations similaires et dans ce site	$1/1000$ année $< F \leq 1/100$ année	F2
Haut : possible et déjà survenue une fois pendant 10 ans	$1/100$ année $< F \leq 1/10$ année	F1
Très haut : déjà survenue plusieurs fois	$F > 1/100$ année	F0

Dans notre cas, nous avons défini la majorité des causes avec l'équipe d'exploitation du four et l'équipe maintenance de l'unité, mais nous avons pris des valeurs de la littérature proposées par ARAMIS en Annexe 7 de DIC [13].

Pour estimer les probabilités des phénomènes dangereux, les probabilités conditionnelles suivantes doivent donc être estimées :

- Probabilité d'inflammation immédiate ;
- Probabilité d'inflammation différée ;
- Probabilité de VCE (explosion de nuage de gaz).

Dans le cadre de la méthode ARAMIS, une étude bibliographique a été menée concernant les probabilités intervenant dans les arbres d'évènements.

Les sources bibliographiques étudiées dans le cadre du projet ARAMIS sont :

- Le purple book,
- Le hse, canvey report,
- Le SAI Study (Canvey Report),
- MHIDAS
- LEES.

Il est proposé dans ARAMIS de tenir compte de trois critères pour évaluer la probabilité d'inflammation immédiate d'un liquide :

- De la conception des installations pour ne pas avoir d'inflammation (mise à la terre des équipements, ATEX, etc) ;
- De la présence d'une cuvette de rétention (qui doit permettre de limiter la taille de la fuite et donc de réduire la possibilité de mise en présence d'une source d'inflammation) ;

ARAMIS propose de retenir les valeurs pour les probabilités d'inflammation différée en fonction de la nature de l'installation. Pour notre cas, l'installation four est une unité de combustion d'où la probabilité d'inflammation est égale à 1.

Etape 3.B : Identification des fonctions et des barrières de sécurité

Pour chaque scénario identifié par MIMAH, les barrières de sécurité techniques ou organisationnelles pouvant limiter la probabilité d'un accident ou en limiter les effets sont identifiées et reportées sur les nœuds-papillon. L'identification est réalisée dans le cadre de

l'analyse des risques en présence de l'industriel. A défaut de fournir un inventaire exhaustif des barrières de sécurité existantes, ARAMIS, propose une méthode pour une identification systématique de ces mesures de sécurité.

La méthode d'identification des barrières est fondée sur la définition de fonctions de sécurité génériques. Ces fonctions de sécurité sont traduites par un verbe d'action suivi d'une intention à accomplir. Cinq verbes d'action permettent ainsi de couvrir l'ensemble des fonctions qu'il convient d'assurer pour maîtriser les risques d'accidents :

Eviter. Il s'agit de rendre un événement impossible. Cette fonction désigne généralement des modifications profondes des installations et est à rapprocher du concept des procédés intrinsèquement plus sûrs.

Prévenir. Il s'agit cette fois de limiter la probabilité d'occurrence d'un événement, sans toutefois pouvoir le rendre impossible.

Détecter. Il s'agit de détecter un événement. Cette fonction seule ne suffit généralement pas à assurer la maîtrise de l'accident et doit être associée à d'autres fonctions comme contrôler ou limiter notamment.

Contrôler. Il s'agit de maîtriser le déroulement d'une dérive afin de ramener le système dans un état opérationnel en sécurité.

Limiter. La fonction « limiter » ou « réduire » consiste à agir sur les conséquences d'un événement afin d'en réduire la gravité. Le système n'est en revanche pas ramené dans un état totalement sûr. Equivalente au terme anglais « to mitigate », cette fonction s'applique le plus souvent au terme source de l'accident (par exemple, limiter un temps de fuite ou un débit).

Les barrières sont classées selon une typologie qui dépend du mode de fonctionnement ou de défaillance des barrières. Il y a donc :

- les barrières dites passives (rétention, murs coupe-feu) qui ne requièrent pas de source d'énergie extérieure pour remplir leur fonction de sécurité,
- les barrières dites actives qui nécessitent une source extérieure d'activation pour remplir leur fonction de sécurité. On peut encore diviser cette classe en sous catégories, mais on y retrouve en fait des organes mécaniques (soupapes, vannes), des systèmes de régulation (en fonctionnement permanent), des systèmes instrumentés de sécurité (activation sur alerte),

- les barrières dites humaines, qui nécessite l'intervention de l'homme pour remplir leur fonction de sécurité.

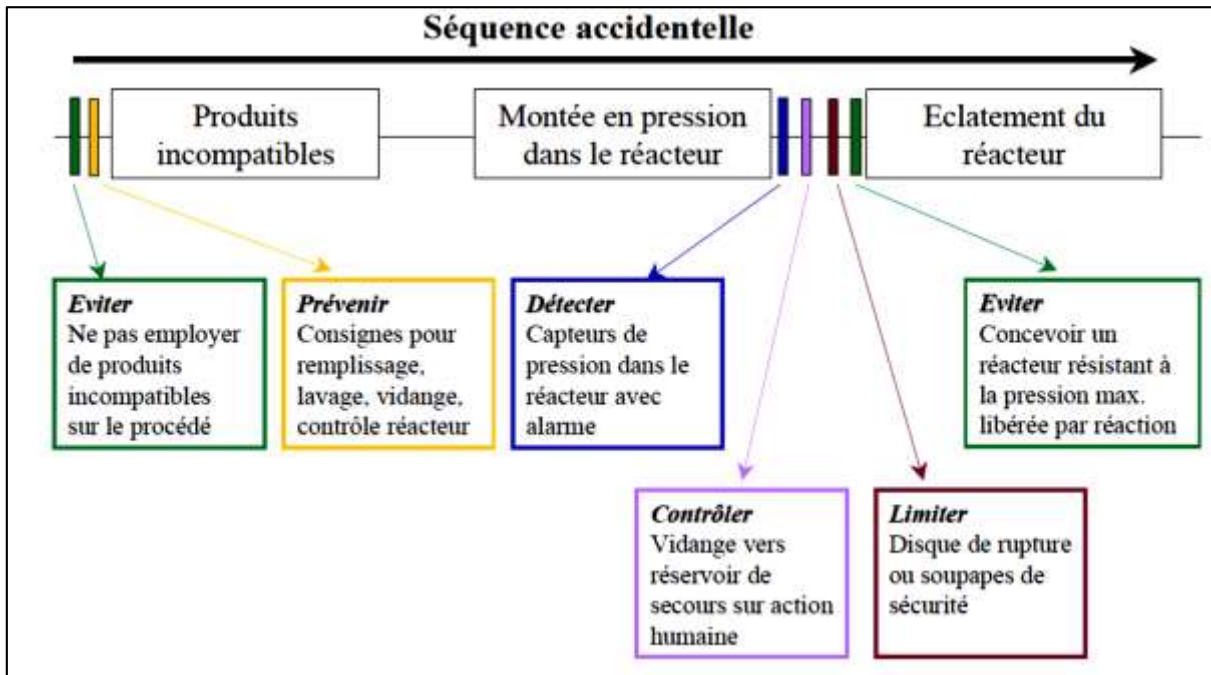


Figure 3-15 : Exemple d'identification des fonctions [1]

- le D1C [13] propose d'utiliser des check-lists données en annexe 8 comme outil de travail explicite, les résultats de cette étape sont présentés dans le Tableau 3-14 suivant :

Tableau 3-14: Identification des barrières de sécurité par branche des arbres des défaillances et des événements identifiés dans l'opération MIIMA.

Branch	Fréquence	Fonction	Barrières
Les Evènements Redoutés Centraux ERC			
ERC 6 : Brèche	F1	Détecter	✓ Débitmètre (chicane de mesure)
		limiter	✓ Vanne principale manuelle
ERC9 : Fuite	F2	Détecter	✓ Débitmètre (chicane de mesure)
		limiter	✓ Vanne principale manuelle ✓ Vannes papillon et servomoteurs gaz ✓ Vanne électrique d'arrêt d'urgence liée au 2 ^{ème} réducteur

Causes nécessaires et suffisantes			
Branche	Fréquence	Fonction	Barrières
surpression interne	F1	Prévenir	✓ Régulation sortie fumée : vanne papillon + moteur extracteur
		Détecter	✓ Prise de pression
		Limiter	✓ Pressostat HP ✓ Vanne électrique liée au 2ème réducteur
Stress mécanique excessif dû à des causes externes	F1	Contrôler	✓ Instruction de travail loin de la zone (pont roulant mouvement)
Rupture brutale	F4	Prévenir	✓ Teste avec caméra infrarouge (semestriel)
Ouverture fonctionnelle	F1	Prévenir	✓ Inspection périodique /2h
Absence de flamme (phase de démarrage)	F1	Détecter	✓ Détecteur de flamme : Photo cellule
		Limiter	✓ Intervention humaine : allumage manuel
Causes directes			
Surcompression	-	contrôle	✓ Vannes papillons avec servomoteur air ✓ Electrovanne
Pression interne élevée	F1	Détecter	✓ Prise de pression
		Contrôler	✓ Régulation fumée et ✓ Système de purge sur les conduits
			✓
Dilatation	F1	Prévenir	✓ Brique réfractaire ✓ Blindage ✓ Joints
3.1. Structure fragile	F1	Prévenir	✓ Maintenance préventive
		Détecter	✓ Inspection avec caméra infrarouge (semestrielle)
4.1 Vanne ouverte par erreur	F1	Eviter	✓ Système automatisé

4.2 Vanne laissée ouverte par erreur (vanne de gaz inerte)	F1	Prévenir	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Gamme opératoire (allumage + extinction) ✓ Séquence obligatoire du programme de l'automate
		contrôle	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Indicateur de l'état de vanne sur le système de contrôle
4.2.Vanne bloquée	F1	Prévenir	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Utilisation d'ordinateur sûr et / ou un système de commande : step7 ✓ Entretien nettoyage, décrêpage
		Détecter	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Inspection visuelle ✓ Débitmètre ✓ Manomètre
		Limiter	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Maintenance curative ✓ Pressostat HP et BP
Pertes d'étanchéité, joints dégradés	F1	Prévenir	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Inspection durant l'Arrêt annuel des vannes
		Détecter	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Inspection par infra-rouge ✓ Analyse de l'oxydation du métal
		Contrôler	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Procédure de nettoyage
Vanne de sécurité, dispositif de déverrouillage de sécurité	F3	Limiter	La conception du processus

Les barrières techniques obtenues ne sont considérée comme pertinente que si elles répondent à la majorité des questions suivantes :

- La fonction est-elle indépendante des autres fonctions de sécurité?
- La barrière a-t-elle une architecture simple?
- Est-ce que la barrière est réparable?
- Est-ce que le commandement rendant la fonction hors service est inaccessible?
- Y a-t-il un système de détection de blocage?
- La barrière est-t-elle conçue en fonction des contraintes spécifiques d'un processus éventuel, comme par exemple la très haute température?

- Y a-t-il un programme d'inspection?

De la même manière, il faut répondre pour les barrières humaines à certaines questions. Si des problèmes surviennent, la barrière ne doit pas être considérée comme pertinente et ne devrait pas être incluse dans les arbres.

- La barrière est-elle indépendante des autres fonctions de sécurité?
- La barrière humaine peut-elle être définie comme une chaîne d'actions simples?
- Les commandes sont-elles accessibles?
- La commande est-elle possible?
- Les opérateurs doivent-ils avoir une pratique périodique des actions nécessaires à la barrière?
- Y' a-t-il une formation prévue ?

✓ Etape 3.C: Evaluation du niveau de confiance des barrières

Les barrières étant identifiées, une évaluation de leur robustesse permet ensuite de :

- Vérifier que la barrière a des performances suffisantes et adaptées ; elle peut ainsi être retenue comme une barrière de sécurité ;
- Evaluer son niveau de confiance, lié à sa probabilité de défaillance ; cette estimation du niveau de confiance est nécessaire pour calculer la probabilité d'occurrence des événements critiques.

Chaque barrière est créditée d'un niveau de confiance initiale dépendant des caractéristiques techniques (en Anglais SIL : Safety Integrity Level) en fonction de sa probabilité estimée de défaillance sur sollicitation (PFD : Probability of Failure on Demand) ou sa probabilité de défaillance horaire $P(t)$. Chaque niveau de confiance correspond à un facteur de réduction de la probabilité d'occurrence de l'événement redouté, donc du risque. Une barrière de sécurité avec un niveau de confiance de n aura une probabilité de défaillance de 10^{-n} et réduira d'un facteur 10^n la probabilité de l'événement.

Tableau 3-15: Niveau de confiance de la conception de la barrière liée à la sûreté de fonctionnement

<i>Niveau de confiance</i>	<i>Réduction du risque</i>	<i>Probabilité de défaillance à la demande (PFD)</i>	<i>Probabilité de défaillance à l'heure</i>
4	10 000	$\geq 10^{-5}$ to $< 10^{-4}$	$\geq 10^{-9}$ to $< 10^{-8}$
3	1 000	$\geq 10^{-4}$ to $< 10^{-3}$	$\geq 10^{-8}$ to $< 10^{-7}$
2	100	$\geq 10^{-3}$ to $< 10^{-2}$	$\geq 10^{-7}$ to $< 10^{-6}$
1	10	$\geq 10^{-2}$ to $< 10^{-1}$	$\geq 10^{-6}$ to $< 10^{-5}$

Les performances font ensuite l'objet d'une éventuelle décote en fonction des résultats de l'audit du management sécurité, c'est l'opération C de ARAMIS, la décote étant différente selon la typologie des barrières (humaine, passive, active..).

L'opération C d'ARAMIS exige une classification de barrière en 11 types car elle attribue pour chaque type **k** des coefficients d'influences **B_{i,k}** liés aux processus managériaux audités symbolisés par l'indice **i**.

Les processus audités liés au cycle de vie des barrières sont les suivants :

- Pour les barrières humaines :

1. Disponibilité du personnel : Il s'agit de s'assurer que l'on disposera du personnel nécessaire à la réalisation des différentes activités suivant les conditions de fonctionnement pouvant être rencontrées (conгés, pics d'activité...),
2. Compétence du personnel : L'objet est ici de s'assurer que le personnel en place dispose du niveau de compétence souhaité, cela inclu notamment la sélection du personnel et sa formation,
3. Implication du personnel et résolution des conflits : Il s'agit de s'assurer du bon comportement des acteurs face à leurs tâches, cela prend en compte notamment la façon dont les arbitrages sont effectués en vue de diminuer la charge de ces derniers,
4. Communication et coordination : L'objet de ces activités est d'assurer une bonne communication entre les acteurs (par exemple en situation d'urgence) et de la bonne coordination des activités (par exemple en phase de travaux),

5. Procédure, modes opératoires et objectifs : Il s'agit enfin de s'assurer que les règles seront suivies, cela prend en compte la vérification de l'adéquation des règles avec les activités à effectuer, la formation à ces règles et l'évaluation de ces dernières.

- Pour les barrières techniques :

6. Détermination des spécifications de conception (incluant l'interface homme/machine), achat, construction, installation, et gestion des pièces : Cela correspond aux activités permettant de s'assurer que les objectifs de sécurité seront correctement remplis,

7. Gestion des inspections, des contrôles et de la maintenance : Il s'agit enfin de suivre dans le temps la performance des barrières, y compris leur (ré) étalonnage.

Pour chaque processus identifié ci-avant, un sous-protocole d'audit est développé. Ce sous protocole correspond au référentiel des activités de gestion à réaliser pour assurer un bon système de management des barrières

Le résultat de l'audit du management de sécurité et le questionnaire sur la culture sécuritaire fournissent un facteur réducteur du SIL. Ce facteur est la multiplication de deux grandeurs, le premier est le niveau de maîtrise S_i de l'entreprise pour chaque processus audité i avec S_0 liés aux résultats du questionnaire sur la culture, le second est le coefficients d'influences $B_{i,k}$ pour chaque type k .

Donc le NC_{op} d'une barrière de type k s'obtient par la formule suivante :

$$NC_{op} = (1 - \sum_{i=0}^7 (1 - S_i) \cdot B_{i,k}) * SIL \quad \text{Eq 3-6}$$

NC_{op} : Niveau de Confiance opérationnel avec la considération de l'influence du management,

S_i : le niveau de maîtrise de l'entreprise pour le processus i audité,

$B_{i,k}$: le coefficients d'influences du processus i pour chaque type k ,

SIL : (Safety Integrity Level) le niveau de confiance de la conception.

La méthode ARAMIS fournit gratuitement un fichier Excel (rating data sheet.xls) dédié au calcul du NC_{op} . Nous avons utilisé ce fichier et les résultats sont présentés dans le Tableau 3-16.

Tableau 3-16 : Résultats de l'évaluation de la performance des barrières

N°	Type de barrière	Fonction de sécurité	Barrières retenue	Données techniques	SOURCE	SIL	NC OP
1	Contrôle Permanente – passive	Prévenir	-Brique réfractaire - Blindage - Joints (au niveau des parois)	Confinement étanche pour fuites crédibles	annexe 9 D1C[13]	3	1.7
4	Permanente – active	Contrôler	-Régulation sortie fumée : vanne papillon + moteur extracteur	BPCS : $10^{-1} < \text{PFD} < 10^{-2}$	LOPA (INERIS 2005 DRA34-Annexe 4)	1	0.33
5	Active – matériel fonctionnant à la demande et réutilisable	- Limiter et Contrôler	-Régulation débit : Vannes papillon et servomoteurs pour chaque zone + Débitmètre -Prise de pression	(1.733/ans = 1.978×10^{-4} /h high demande)	Lees (INERIS 2005 DRA34-Annexe 4)	0	0
				(1.413/ans = 1.613×10^{-4} /h)		0	0
6	Active – automatique	- Limiter	- Vanne électrique d'arrêt d'urgence liée au 2 ^{ème} réducteur - Pressostat HP /BP	✓ ($10^{-2} < \text{pfd} < 10^{-1}$)	Annexe 9 D1C	1	0.57
				✓ ($10^{-2} < \text{pfd} < 10^{-1}$)		1	0.57
7	Active – manuelle L'action humaine est déclenchée par un système de détection	Prévenir	- Vanne principale manuelle - Maintenance curative	✓ Taux de défaillance (90% de confiance) = 0.03×10^{-6} /heur - Action humaine	✓ EIReD (ineris 2005 DRA34-Annexe 4) Annexe 9 D1C	4	0
		Limiter Détecter				1	0

8	Active – avertissement passif L'action humaine est conditionnée par un avertissement passif	Prévenir	- Instruction de travail loin de la zone four (pour le pont roulant en mouvement)	- Procédure	Annexe 9 D1C[13]	1	0.61
9	Active – assistée Un logiciel présent un diagnostic à un opérateur	Détecter	- Détecteur de flamme : Photo cellule IR	7.4*10 ⁻⁶ /h	OREDA (INERIS 2005 DRA34- annexe 4)	1	0.37
10	Active – procédure Observation des conditions locales par un opérateur	Prévenir	- Test avec caméra infrarouge (semestriel) - Inspection MRE - Gamme opératoire (allumage + extinction) - Entretien nettoyage, décrêpage) - Inspection périodique /2h - Inspection durant l'Arrêt annuel des vannes - Maintenance préventive		✓ Annexe 9 D1C	2 2 2 2 2 2	0 0 0 0 0 0
11	Active – situations d'urgence Réponse humaine improvisée suite à l'observation des conditions locales		- Intervention humaine : allumage manuel		Annexe 9 ✓ D1C	0	

✓ **Etape 3.D. Calcul de la probabilité d'occurrence de l'ERC**

En prévention (partie gauche du nœud papillon), la mise en œuvre d'une barrière réduit la probabilité d'occurrence de l'événement redouté central et peut éventuellement générer des sous-événements critiques à prendre en compte. En protection (partie droite du nœud papillon), la mise en œuvre d'une barrière réduit la probabilité d'observer l'effet majeur envisagé et conduit éventuellement à considérer un sous-événement avec un effet réduit. La barrière identifiée est reportée sur les arbres. L'effet de la barrière dépend de son type ;

- Barrière EVITER : peut conduire à éliminer un scénario ou conduire à un nouveau scénario avec des effets réduits.
- Barrière PREVENIR et CONTROLER : réduit la fréquence ou la probabilité des causes et des événements en aval par un facteur de 10^{NCop} .

Dans cette partie de l'étude nous avons développé le calcul des probabilités pour le scénario de la fuite et brèche avec un diamètre large (ERC6-9 'large).

Pour le calcul de la probabilité finale de l'Événement Redouté central

A titre d'exemple en prend la branche suivante :

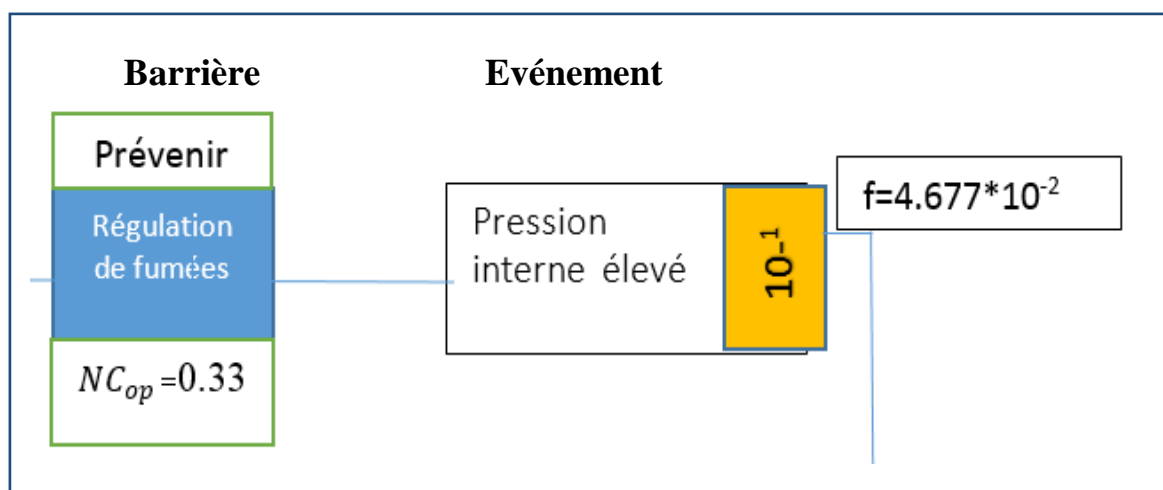




Figure 3-16: Exemple de calcul de probabilité d'un événement en prenant en compte la barrière prévenir

La fréquence de l'événement pression interne élevée est égale à 10^{-1} /ans, nous calculons la nouvelle fréquence F après la considération de la barrière (régulation de fumée) comme suit :

$$F = 10^{-0.33} \times 10^{-1} = 4.677 \times 10^{-2}$$

Tableau 3-17 : Règles de calcul des probabilités dans un arbre des défaillances:

Porte	Symbole	Entrées de la branche	Calcul de la sortie de la branche	Unité
Ou		P_A Ou P_B	$P(A \text{ Ou } B) = 1 - (1 - P_A) \times (1 - P_B)$ $= P_A + P_B + P_A \times P_B$ $\cong P_A + P_B$	
		F_A Ou F_B	$F(A \text{ Ou } B) = F_A + F_B$	Ans ⁻¹
		P_A Ou F_B	Non autorisé	
Et		P_A Et P_B	$P(A \text{ Et } B) = P_A \times P_B$	
		F_A Et F_B	Non autorisé	
		P_A Et F_B	$F(A \text{ Et } B) = P_A \times F_B$	Ans ⁻¹

La probabilité des ERC 6-9 'large' après calcul de l'arbre des défaillances est égale à :

$$P_{\text{ERC}} = 6.8019877 \times 10^{-2}$$

Les détails des calculs sont présentés sur le nœud papillon.

Etape 5: Calcul des fréquences des phénomènes dangereux (PD)

La fréquence des phénomènes dangereux est ensuite calculée à partir de celles des événements critiques et des distributions de probabilités de chaque phénomène dangereux potentiel. L'annexe 12 du rapport D1C [13] donne des exemples de probabilités de phénomènes dangereux dont certains sont repris ci-après.

Les règles de calcul dans un arbre d'événement sont résumées par la Figure 3-17 ci-dessous :

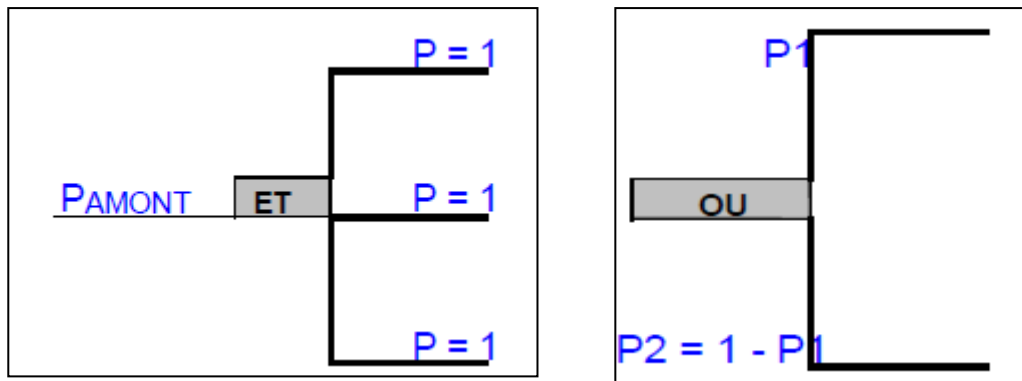


Figure 3-17: Règles de calcul des probabilités de l'arbre des évènements

le départ de notre arbre d'évènements de l'ERC6-9 'large' est une porte « ou », une Inflammation non immédiate selon ARAMIS à une probabilité $P_{ni} = 0.98$ [10], donc la probabilité d'Inflammation immédiate P_{ii} est égale à : $P_{ii} = 1 - P_{ni} = 1 - 0.98 = 0.02$.

L'estimation de la probabilité du VCE selon ARAMIS dépend de l'encombrement du site. Dans le cas de l'unité de notre étude (LRB), l'encombrement est fort ce qui implique une probabilité $P_{vce} = 2/3$. Ce qui implique une probabilité du flash fire $P_{ff} = 1/3$ car la porte est « ou ».

La probabilité finale des phénomènes dangereux P_{PD} égale à :

- $PD1$: VCE (explosion d'un nuage de gaz)

$$P_{PD1} = P_{ERC} \times P_{ni} \times P_{vce}$$

$$P_{PD1} = 6.8019877 \times 10^{-2} \times 0.98 \times 2/3$$

$$\mathbf{P_{PD1} = 4.444 \times 10^{-2}}$$

- $PD2$: flashfire

$$P_{PD2} = P_{ERC} \times P_{ni} \times P_{ff}$$

$$P_{PD2} = 6.8019877 \times 10^{-2} \times 0.98 \times 1/3$$

$$\mathbf{P_{PD2}=2.222 \times 10^{-2} \times 10^{-2}}$$

- PD3 : feu de torche

$$P_{PD3} = P_{ERC} \times P_{ii}$$

$$P_{PD2} = 6.8019877 \times 10^{-2} \times 0.02$$

$$\mathbf{P_{PD2}=1.3604 \times 10^{-3}}$$

**Figure 3-17 : Nœud papillon final pour les ERC 6-9
taille large**

En format A3

✓ **Etape 6: Estimation de la classe de gravité des phénomènes dangereux (PD)**

La sélection des scénarios d'accidents de référence (RAS) est basée sur l'évaluation des probabilités des phénomènes dangereux, ainsi que leurs conséquences potentielles. Les conséquences de chaque phénomène dangereux doivent être évaluées de façon qualitative. Cette évaluation sera basée sur les quatre classes de conséquences définies dans le Tableau 3-18 et prendront en compte la présence des barrières de sécurité dans l'arbre des événements.

Tableau 3-18 : Définition des classes de gravité des PD[1]

CONSEQUENCES			CLASSE
Effet domino	Effet sur cibles humaines	Effets sur l'environnement	
<i>Voir note</i>	Pas de blessures ou blessures légères ne nécessitant pas d'arrêt de travail	Pas d'action nécessaire, simple observation	C ₁
<i>Voir note</i>	Blessures nécessitant une hospitalisation de durée supérieure à 24 heures	Sérieux effets sur l'environnement, nécessitant des moyens locaux d'intervention	C ₂
<i>Voir note</i>	Blessures irréversibles ou morts sur site Blessures réversibles à l'extérieur	Sérieux effets sur l'environnement à l'extérieur du site, nécessitant des moyens nationaux d'intervention	C ₃
<i>Voir note</i>	Blessures irréversibles ou morts à l'extérieur du site	Effets irréversibles sur l'environnement à l'extérieur du site, nécessitant des moyens nationaux d'intervention	C ₄

Remarque pour les effets domino : si un phénomène dangereux peut entraîner par effet domino un deuxième phénomène dangereux et que la classe de gravité de ce deuxième phénomène dangereux est plus élevée que celle du premier phénomène dangereux, la classe de gravité de ce dernier doit être augmentée à la classe de gravité du deuxième phénomène dangereux.

Au-delà de cette grille, ARAMIS propose également en fonction de la nature des phénomènes dangereux et des produits impliqués une classification a priori des phénomènes. En cas de doute, des calculs complémentaires peuvent être menés pour valider la classe de gravité correspondante.

Tableau 3-19: Estimation grossière des classes de gravité par phénomène dangereux

<i>Phénomène dangereux</i>	<i>Classe de conséquences</i>
Feu de nappe	C2
Feu de cuve	C1
Jet enflammé	C2
VCE	C3 ou C4 (en fonction de la quantité émise)
Flashfire	C3
Nuage toxique	C3 ou C4 (en fonction des phrases de risques – C4 pour des substances très toxiques)
Feu	C2
Projection de missiles	C3
Création onde de surpression	C3
Boule de feu	C4
Dégâts à l'environnement	A juger sur site
Explosion de poussières	C2 ou C3 (en fonction de la substance et de la quantité)
Boilover et feu de nappe associé	C3

Dans notre cas d'étude, nous avons 3 Phénomènes dangereux :

- Jet enflammé ou feu de torche = C2
- VCE = C3 (le volume du gaz n'est pas suffisant pour une classe C4)
- Flash fire = C3

✓ **Etape 7: Utilisation de la matrice de risque pour identifier le scénario d'accident de référence**

Les scénarios peuvent donc à ce stade être placés sur une matrice de risques, qui définit des critères d'acceptabilité et de sélection des scénarios en fonction de cette caractérisation en gravité / fréquence.

La matrice de risques comporte en abscisse la classe de gravité des phénomènes dangereux et en ordonnée la fréquence d'occurrence des phénomènes dangereux.

La zone verte (effets négligeables) correspond aux phénomènes dangereux avec une fréquence d'occurrence et/ou des conséquences suffisamment faibles pour ne pas être considérés comme représentatifs du risque d'un établissement.

La zone jaune (effets moyens) correspond aux phénomènes dangereux dont la probabilité est tolérable et qui représente le niveau de risque moyen d'un établissement. Les phénomènes dans cette zone sont retenus pour la modélisation et constituent les scénarios de référence.

La zone rouge (effets importants) correspond à des phénomènes dangereux dont la probabilité d'occurrence n'est pas satisfaisant en l'état : des barrières complémentaires de sécurité doivent être rajoutées. Les phénomènes dans cette zone sont retenus pour la modélisation et font également partie des scénarios de référence.

Tableau 3-20 : Placement des DP de l'unité d'étude (LRB) dans la matrice de risque de ARAMIS

FREQUENCE	10 ⁻² /ans			VCE, Flashfire	
	10 ⁻³ /ans		Feu de torche		
	10 ⁻⁴ /ans				
	10 ⁻⁵ /ans				
	10 ⁻⁶ /ans				
	10 ⁻⁷ /ans				
	10 ⁻⁸ /ans				
	Classe de gravité	C1	C2	C3	C4

Les scénarios d'accident (RAS) de référence de cette unité sont par ordre d'importance :

- VCE
- Flashfire (feu de flash)
- Feu de torche

3.3.2. Opération B : Etude de la sévérité des phénomènes dangereux

L'étude de la sévérité ou opération B de ARAMIS consiste à apprécier le potentiel de risque représenté par un site industriel, à travers la modélisation de la sévérité de certains scénarios d'accident identifiés lors de l'opération précédente.

L'appréciation de ce potentiel de risque se traduit dans l'opération par l'élaboration de cartes de sévérité. Pour ce faire, la cartographie est basée sur deux principes.

D'abord la sévérité des scénarios est calculée à partir de seuils d'effets préétablis indépendants du nombre ou type de cibles dans l'environnement du site. Ensuite la sélection des scénarios dont la sévérité est modélisée correspond aux résultats de la méthode MIRAS, c'est-à-dire que les scénarios de référence choisis dans l'opération A sont considérés représentatifs du niveau de risque résiduel d'un site industriel.

3.3.2.1 Seuils des effets

L'ensemble des partenaires européens du projet ARAMIS ont été interrogés afin de connaître les seuils d'effets Majeurs EM (thermiques, surpression, inhalation toxique, effets missiles) utilisés dans leurs pays pour l'évaluation des conséquences des phénomènes accidentels. Les données recueillies concernent la Belgique, l'Espagne, l'Italie et la France [14].

Tableau 3-21 : Seuils des effets adopté dans le cadre d'ARAMIS

Valeur de S (Indice de sévérité)	EM1: Effets thermiques (KW.m ⁻²)	EM2: Effet de surpression (mbar)	EM 3: Missiles	EM4: Effets toxiques
	t= 60 s 1.8			t= 1 h
0	1	10	0	0.1 TEEL1
25	1.8	30	Non spécifique	TEEL1
50	3	50		TEEL2
75	5	140		TEEL3
100	8	250	100	TEEL

TEEL (*Temporary Emergency Exposure Limits*): limite d'exposition critique temporaire au produit toxique ; ARAMIS adopte les valeurs de l'USDE (*U.S. Department of Energy*), 2000. *ERPGs and TEELs for chemicals of concern*[15].

3.3.2.2. Indice de sévérité

✓ Définition

Un indice de sévérité est une mesure quantitative ou qualitative, orientée à intégrer en une valeur numérique ou en un adjectif descriptif, un ensemble de facteurs qui ont une influence sur les dangers ou les risques d'un système [14].

L'Indice de sévérité des risques (**S**) est basé sur un ensemble de Phénomènes Dangereux (DP) et de leurs événements majeurs correspondants (EM), identifiés grâce à l'application de la méthodologie MIMAH §3.2.2 . Il prend en compte aussi bien un ensemble uniforme de seuils concernant les effets d'accidents divers.

L'Indice de sévérité des risques pour un événement critique donné, **S_{CE}**, est une combinaison Indices de sévérité du risque spécifique, **S_{DP}**, associés à chacun des phénomènes dangereux que l'événement critique a, de cette façon que les probabilités d'occurrence peuvent être prises

$$S_{CE}(d) = \sum_{i=1}^n (P_{DP_i} \cdot S_{DP_i}(d)) \quad \text{Eq 3-5}$$

en compte[14]:

Où n : le nombre des phénomènes dangereux associés à l'évènement critique,

P_{DP} : la probabilité d'occurrence du phénomène dangereux.

L'Indice de la sévérité des risques pour **l'ensemble de l'installation**, **S**, est une combinaison des indices de sévérité, **S_{CE}**, des risques associés à chacun des événements critiques

$$S(d) = \sum_{j=1}^m (f_{CE_j} \cdot S_{CE_j}(d)) \quad \text{Eq 3-6}$$

considérés et leurs fréquences d'apparition [14] :

Dans cette expression m est le nombre total d'événements critiques (CE) associés à l'installation; f_{CE_j} est la fréquence d'apparition de la CE_j ; et $S_{CE_j}(d)$ est l'indice de gravité de risque associé à la CE_j .

Tableau 3-22 : Niveaux de l'indice de sévérité d'une installation [14]

S	Niveau de l'indice de sévérité
$S = 750$	Extrêmement élevé
$300 = S < 750$	Elevé
$50 = S < 300$	Moyen
$S < 50$	faible

La valeur de **S** varie en fonction de la distance ; de cette manière, des cartes de sévérité peuvent être construites autour d'une installation. Cinq distances sont proposées pour chaque phénomène dangereux impliqué.

Tableau 3-23 : Relation entre la valeur S et la distance où cette valeur est atteinte

S_{DP}	<i>distance</i>
0	d_0
25	d_1
50	d_2
75	d_3
100	d_4

Une fois que les distances d_0 et d_4 ont été trouvées grâce à l'application des modèles, la valeur de **S** à toute distance peut être obtenue en appliquant les équations linéaires à l'intérieur de chaque gamme (Tableau 3-23).

Tableau 3-24 : Equations linéaires S_{DP}

<i>Equation</i>	
$S_{DP} = \frac{25}{(d_1 - d_0)} \cdot x - \frac{25 \cdot d_0}{(d_1 - d_0)}$	$d_1 < x < d_0$
$S_{DP} = \frac{25}{(d_2 - d_1)} \cdot x + \frac{(25 \cdot d_2 - 50 \cdot d_1)}{(d_2 - d_1)}$	$d_2 < x < d_1$
$S_{DP} = \frac{25}{(d_3 - d_2)} \cdot x + \frac{(50 \cdot d_3 - 75 \cdot d_2)}{(d_3 - d_2)}$	$d_3 < x < d_2$
$S_{DP} = \frac{25}{(d_4 - d_3)} \cdot x + \frac{(75 \cdot d_4 - 100 \cdot d_3)}{(d_4 - d_3)}$	$d_4 < x < d_3$

✓ **Calcul de l'indice de sévérité spécifique S_{DP}**

L'indice de sévérité de chaque Phénomène Dangereux (DP) est défini en fonction de leurs effets majeurs correspondants (EM) [16].

$$S_{DP-ME1}(d) = 29.23 \cdot \ln(Q(d)) + 2.29 \quad \text{Eq 3-7}$$

$$S_{DP-ME2}(d) = 15.4 \cdot \ln(\Delta P(d)) - 8 \quad \text{Eq 3-8}$$

$$S_{DP-M3}(d) = \begin{cases} 100 & \text{if } d \leq d_{100\%} \\ 0 & \text{if } d > d_{100\%} \end{cases} \quad \text{Eq 3-9}$$

$$S_{DP-ME4}(d) = 100 \cdot \frac{C(d)}{IDLH} \quad \text{Eq 3-10}$$

d : la distance pour laquelle l'indice est calculé;

Q(d) : la radiation (KM/m²) calculée à une distance d;

dP(d) : la surpression (mbar) calculée à une distance d;

d_{100%} : la distance où 100% de missiles sont trouvés;

C(d) : la concentration max atteinte à une distance d.

pour les phénomènes dangereux DP ayant plusieurs évènements majeurs ME, l'indice de sévérité total est égal au max.

✓ **Sélection du scénario**

Pour notre cas d'étude, le scénario le plus probable est le VCE (Explosion de nuages de vapeur), donc nous allons modéliser ce phénomène seulement dans cette partie (résultat de l'opération A).

i. Définition du phénomène

Le VCE (*Vapor Cloud Explosion*) est un phénomène de combustion rapide à l'air libre d'une masse d'hydrocarbures comprise entre ses limites d'explosivité. Cette explosion est confinée dans un espace clos ou non ; elle peut également être non confinée (cas de l'UVCE-*Unconfined Vapor Cloud Explosion*).

Le phénomène était jusqu'à maintenant modélisé selon la méthode TNT. D'où nous avons utilisé ce modèle à l'aide du logiciel PHAST Risk.

ii. Estimation des effets par le Model TNT

Ce modèle est le plus ancien au monde pour prévoir les conséquences de tout type d'explosion accidentelle. Il repose sur l'hypothèse selon laquelle, il doit être possible de reproduire le champ de surpression qui est engendré par une explosion donnée (de gaz, d'un explosif condensé, ...) en faisant exploser du TNT. Ainsi, l'équivalent TNT d'un mélange gazeux explosible correspond à la masse de TNT qui on l'explosant engendrerait le même champ de surpressions que celui engendré par l'explosion d'un 1kg du mélange explosible considéré. Cet équivalent TNT, noté par la suite M_{TNT} , est calculé au moyen de la relation ci-après.

$$M_{TNT} = a \times \frac{E_{gaz}}{E_{TNT}} \quad \text{Eq 3-11}$$

Où : E_{gaz} : l'énergie que le combustible considéré peut libérer après combustion,

E_{TNT} : l'énergie libérée par l'explosion d'un kg de TNT soit environ 4690 kJ,

a : « rendement » de l'explosion de gaz.

Le rendement 'a', possède différentes significations selon ce que représente exactement l'énergie Egaz.

En effet, Egaz peut représenter l'énergie de combustion de :

- La totalité de la masse de combustible rejetée accidentellement (sachant qu'une partie seulement de cette masse sera dans les limites d'explosibilité),
- Ou de la masse de combustible mélangée avec l'air en proportions explosibles.

Dans le premier cas, le rendement 'a' est à considérer comme « global » dans le sens où il qualifie à la fois le rendement ou l'efficacité :

- Du rejet et de sa dispersion pour former un mélange explosible,
- Et de la propagation des flammes (explosion proprement dite) pour engendrer des ondes de surpression d'amplitude plus ou moins importante.

Dans le second cas, 'a' représente un rendement qui qualifie la capacité des flammes à engendrer des surpressions. Il ne s'agit donc, dans ce cas, que d'un rendement « d'explosion».

Ensuite, quel que soit le type de cas considéré, 'a' est généralement déterminé à partir de l'analyse des accidents passés.

iii. Model TNT du logiciel PHAST Risk

Nous avons collecté les données suivantes pour le logiciel :

- Données climatiques (source : étude d'impact ARCELORMITTAL) :

vitesse moyenne du vent = 3,2 m/s

Stabilité = D

- Données sur la substance dangereuse (gaz naturel) :

Substance : Méthane

Masse : 1256,64 Kg

- Données pour la carte des effets :

Le pas = 1 m

La distance max de l'étude : 210 m (car la longueur de l'unité =210 m)

- Données nécessaire au model :

Le rendement TNT : nous avons pris 10%, valeur attribuée aux hydrocarbures (gaz naturel).

iv. **Résultats fournis par le PHAST Risk pour les effets de la surpression**

Les distances critiques (Figure 3-21) pour les seuils prédéfinies du logiciel sont :

Surpression (bar) P	Distance (m)
0,02	365,86
0,14	94,73
0,21	73,30

La courbe de variation de la surpression en fonction de la distance est présentée dans la figure suivante :

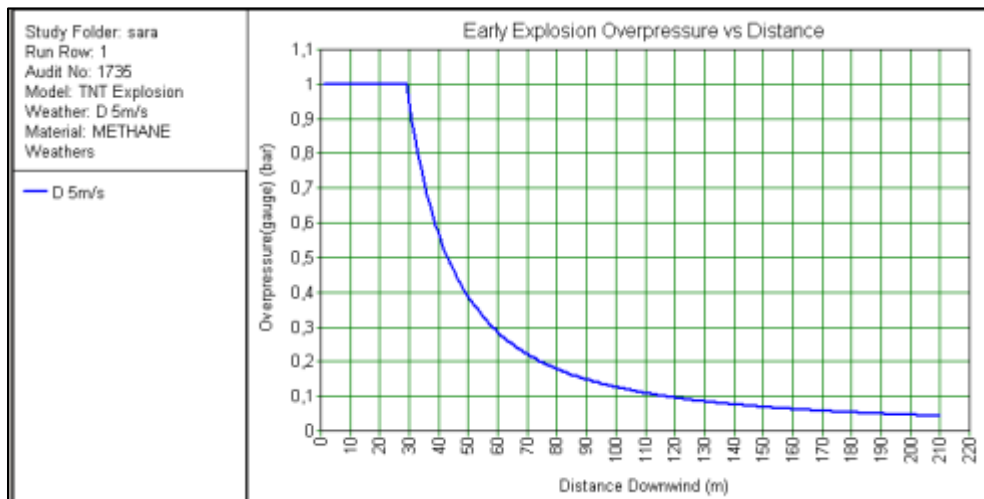


Figure 3-18: Courbe de variation de la surpression en fonction de la distance du PHAST RISK

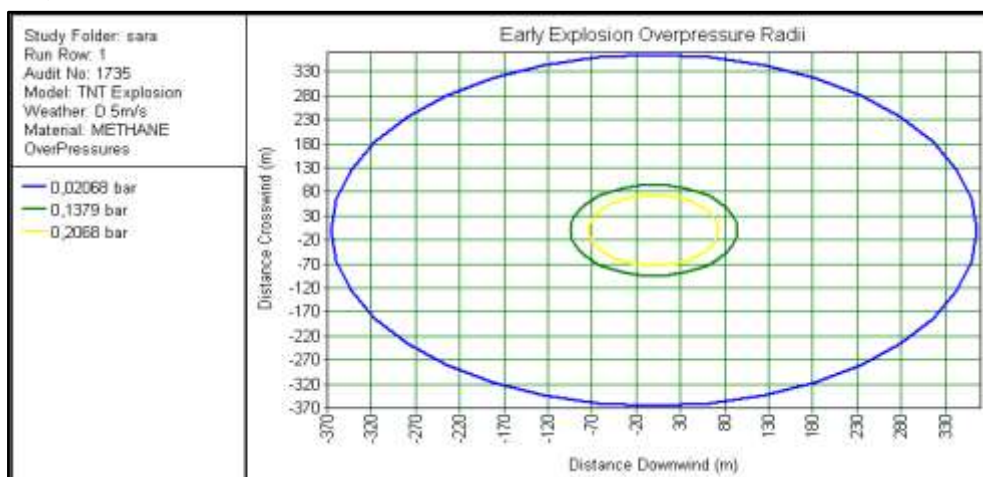


Figure 3-19 : Propagation du nuage radial et vertical selon PHAST Risk

v. Estimation de loi de variation de la surpression :

Nous avons pris les valeurs de la surpression à chaque pas (1m) sur Excel et nous avons estimé selon l'allure des points à partir du point 29 m.

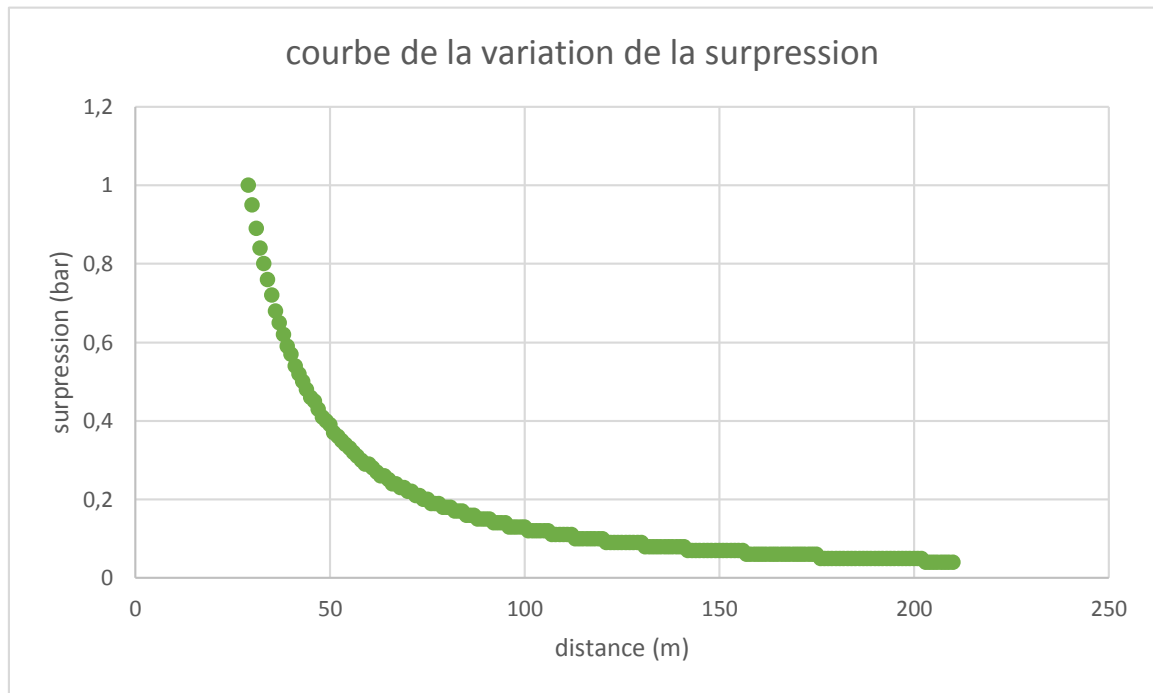


Figure 3-20: Courbe de variation de la surpression sur Excel 2013

Nous avons utilisé le rapport fourni par PHAST Risk pour avoir les valeurs de cette courbe.

Après nous avons utilisé l'option du logiciel Excel « courbe de tendance » pour choisir l'équation de cette courbe selon le coefficient de détermination R^2 le plus proche de l'unité.

Les lois proposées par Excel :

- La loi exponentielle :

$$y = 0,7231 \cdot e^{-0,015x}$$

$$:R^2 = 0,9243$$

- La loi linéaire :

$$y = -0,0028 x + 0,5171$$

$$R^2 = 0,6122$$

- La loi logarithmique :

$$y = -0,328 \ln(x) + 1,7065$$
$$R^2 = 0,8117$$

- Polynôme d'ordre 2 :

$$y = 4E-05 x^2 - 0,0122 x + 0,9691$$
$$R^2 = 0,8687$$

- Polynôme d'ordre 3:

$$y = -5E-07 x^3 + 0,0002 x^2 - 0,0314 x + 1,5315$$
$$R^2 = 0,9593$$

- Loi puissance :

$$y = 178,19 x^{-1,568}$$
$$R^2 = 0,9966$$

Nous remarquons ici que la loi puissance a le meilleur coefficient de détermination R^2 (proche de l'unité). Donc nous allons adopter cette loi pour la variation de la surpression $\Delta P(d)$ en mbar.

Où
$$\Delta P(d) = 0,17819 d^{-1,568}$$

vi. Calcul de l'indice de sévérité du VCE : S_{VCE}

Notre étude est consacrée aux effets de la surpression (ME 2 : Major Effect 2).

Donc nous allons utiliser l'équation d'ARAMIS Eq3-8 pour le calcul de S_{VCE}

On a d'après l'étape précédente : $\Delta P(d) = 0,17819 d^{-1,568}$

Donc
$$S_{VCE}(d) = 15,4 \ln(0,17819 d^{-1,568}) - 8$$

Après simplification l'indice de sévérité du VCE est égal à :

$$S_{VCE}(d) = -34,56 - 24,15 \ln(d)$$

vii. Calcul de l'indice de sévérité de l'événement redouté ERC6-9 :

$S_{ERC6-9}(d)$ égal à :

$$S_{ERC6-9}(d) = P(VCE) \times S_{VCE}(d)$$

$$\Rightarrow S_{\text{ERC6-9}}(d) = 4,444 \cdot 10^{-2} \times (-34,56 - 24,15 \ln(d))$$

$$\Rightarrow S_{\text{ERC6-9}} = -1,54 - 1,073 \ln(d)$$

viii. Calcul des distances de sévérité

- calcul de d_0 :

$$\text{pour } S_{\text{VCE}}(d_0)=0 \Rightarrow -34,56 - 24,15 \ln(d_0)=0$$

$$\Rightarrow \ln(d_0) = -1,43$$

$$\Rightarrow \mathbf{d_0 = 230 \text{ m}}$$

- calcul de d_1 :

$$\text{pour } S_{\text{VCE}}(d_1)=25 \Rightarrow -34,56 - 24,15 \ln(d_1)=25$$

$$\Rightarrow \ln(d_1) = -2,47$$

$$\Rightarrow \mathbf{d_1 = 85 \text{ m}}$$

- Calcul de d_2 :

$$\text{pour } S_{\text{VCE}}(d_2)=50 \Rightarrow -34,56 - 24,15 \ln(d_2) = 50$$

$$\Rightarrow \ln(d_2) = -3,5$$

$$\Rightarrow \mathbf{d_2 = 30,15 \text{ m}}$$

- Calcul de d_3 :

$$\text{pour } S_{\text{VCE}}(d_3)=75 \Rightarrow -34,56 - 24,15 \ln(d_3) = 75$$

$$\Rightarrow \ln(d_3) = -4,54$$

$$\Rightarrow \mathbf{d_3 = 10,7 \text{ m}}$$

$$\text{pour } S_{\text{VCE}}(d_4)=100 \Rightarrow -34,56 - 24,15 \ln(d_4)=100$$

$$\Rightarrow \ln(d_4) = -5,57$$

$$\Rightarrow \mathbf{d_4 = 3,8 \text{ m}}$$

Tableau 3-24: Résultat des calculs des distances de sévérité d'un VCE du Four de l'unité LRB selon ARAMIS

Description des effets	Valeur seuil du S_{VCE}	Distance
Peu ou pas d'effets	0	$d_0 = 230$ m
Effets réversibles	25	$d_1 = 85$ m
Effets irréversibles	50	$d_2 = 30,15$ m
Début des effets létaux	75	$d_3 = 10,7$ m
Effet létaux significatif (selon le nombre de personnes exposées)	100	$d_4 = 3,8$ m

ix. Calcul des équations linéaires de variation de l'indice de sévérité

Nous remplaçons les valeurs des distances de sévérité obtenue dans la partie précédente dans les équations du tableau 4-4 :

Pour $85 \text{ m} < x < 230 \text{ m}$: $S_{VCE} = -0,17 x + 39,66$

Pour $30,15 \text{ m} < x < 85 \text{ m}$: $S_{VCE} = -0,46 x + 63,74$

Pour $10,7 \text{ m} < x < 30,15 \text{ m}$: $S_{VCE} = -1,29 x + 88,75$

Pour $3,8 \text{ m} < x < 10,7 \text{ m}$: $S_{VCE} = -3,62 x + 113,77$

A partir de ces équations nous pouvons estimer la valeur de l'indice de sévérité à n'importe quel point dans un rayon de 3,8 m à 230 m du four.

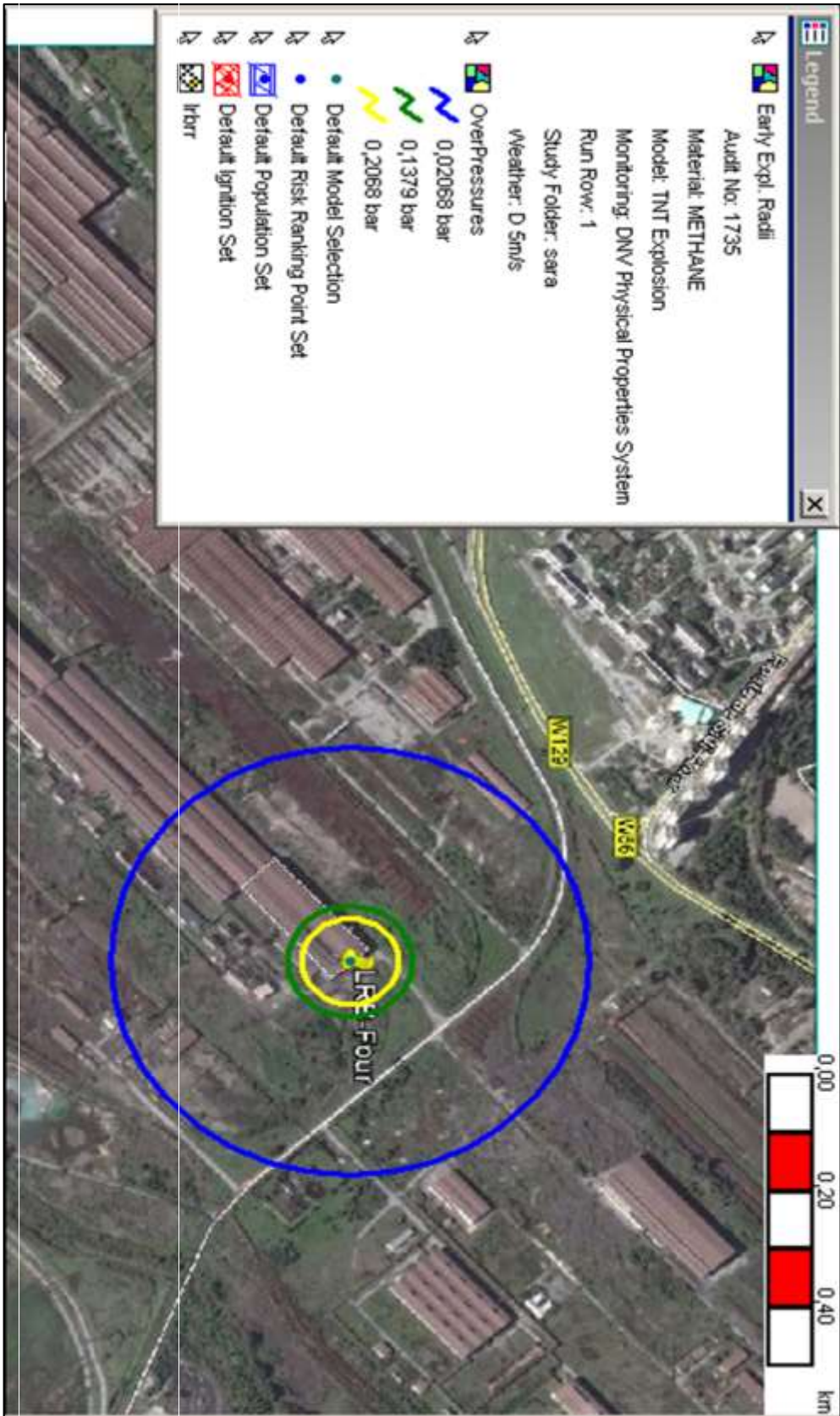


Figure 3-21: Cartographie des effets de la surpression du VCE (source : PHASTE RISK, la carte GOOGLE EAURTH)

3.4. Interprétations et recommandations

Après le calcul des distances de sévérité selon ARAMIS, nous remarquons qu'à une distance de 230 m de notre équipement critique (four), l'explosion n'a aucun effet de surpression. Nous constatons par ailleurs qu'à une distance inférieure à 10 m, les effets peuvent être létaux et dépendent du nombre de personnel présent sur les lieux avoisinants.

Les résultats de cette partie, nous aideront à proposer à l'entreprise les recommandations suivante :

- Mettre en place le point de rassemblement à un rayon de 100 m du four, car à partir de cette distance les effets du scénario d'accident majeur sont négligeables. La position actuelle du point de rassemblement se trouve dans une zone à effet irréversible.
- Revoir les plans d'évacuation pour éviter que les issues de secours soient proches des rayons de l'explosion (loin de 30 m du four).
- Placer un système anti-incendie qui se déclenche par des détecteurs de gaz, pour éviter l'inflammation du gaz en cas de fuite, sachant qu'aucun système de détection ou d'alarme n'est disponible au voisinage du four.
- Etablir une zone d'interdiction d'accès au voisinage de 10 m du four.
- Diminuer l'effectif dans la zone four.

CONCLUSION

La prévention des risques majeurs présente toujours un défi aux industriels. Cela est dû à la difficulté de mesurer le développement des scénarios d'accidents majeurs et de leurs conséquences vis-à-vis des cibles.

Notre étude est consacrée à l'analyse approfondie par l'entremise de la méthode ARAMIS, des risques majeurs au niveau de l'unité Laminoir Rond à Béton (LRB), de l'entreprise Arcelor Mittal Algérie située à Annaba, certifié OHSAS 18001.

Pour ce faire, nous avons mené dans un premier temps une Analyse Préliminaire des Risques (APR) qui nous a permis d'identifier 31 risques au niveau des 4 zones (Four, Laminage, Refroidissement et Expédition). Il se trouve que les équipements de la zone Four sont ceux qui représentent un risque majeur.

Dans un second temps, nous avons opté pour la méthode ARAMIS pour les avantages qu'elle apporte. En effet, cette dernière s'applique aux installations en exploitation et dotées d'un système de management de la sécurité, c'est le cas de l'unité LRB. Les résultats du déroulement de la première partie de la méthode ARAMIS identifient deux évènements redoutés centraux (ERC) pour le four et qui sont :

- **ERC 1 : Brèche des parois**
- **ERC 2 : Fuite de gaz**

L'élaboration de trois arbres des défaillances (type ARAMIS et REX) partant de nos deux ERC nous a éclaircis sur leurs enchainements causals.

Par ailleurs, les arbres des évènements réalisés à partir des mêmes ERC nous font ressortir trois phénomènes dangereux :

- **PhD1 : VCE (Explosion d'un nuage de gaz),**
- **PhD2 : Feu de flash (Flash fire)**
- **PhD3 : Feu de torche (Jet fire)**

La deuxième partie de la méthode ARAMIS, nous a permis d'identifier les fonctions et les barrières de sécurité techniques ainsi qu'organisationnelles et d'évaluer leurs niveaux de confiance, afin de les prendre en considération dans le calcul des probabilités d'occurrence des ERC.

Le nœud papillon réalisé, en prenant en considération les barrières, pour la taille large de la brèche et la fuite nous a permis de calculer les probabilités des phénomènes dangereux et de positionner ces phénomènes dangereux dans la matrice de risque de la méthode ARAMIS. Ce qui nous donne deux types de phénomènes :

- **Phénomènes à effets importants : PhD₁ et PhD₂**
- **Phénomène à effets moyens : PhD₃**

Le **PhD₁** a été choisi pour l'étude de la sévérité vu sa forte probabilité. À l'aide du logiciel PHAST RISK (model TNT) nous avons estimé les effets de la surpression du **PhD₁ (VCE)** au niveau du four. Les résultats obtenus montrent que :

- La visualisation des effets de la surpression selon trois distances révèle que **les effets du VCE débordent de la limite de l'unité LRB.**
- Une variation de la surpression en fonction de la distance par rapport au four.

Enfin, la modélisation de cette variation en loi puissance nous a donné la possibilité de calculer l'indice de sévérité selon la méthode ARAMIS pour le phénomène VCE à n'importe quel point du périmètre d'étude.

Les résultats obtenus par cette étude sont très intéressants, aussi, il serait souhaitable d'une part, la prise en compte des recommandations mentionnées dans ce rapport et celles citées ci-après pour une mise en pratique dans le cadre de la prévention des risques au niveau de l'unité LRB :

- Mettre en projet de nouveaux plans d'urgence au niveau de cette unité selon les distances de sévérité calculées dans cette étude.
- Mener une étude sur les barrières techniques de la prévention pour diminuer la probabilité des ERC de type Fuite et brèche.
- Mettre en place des barrières de protection adaptées aux effets d'une explosion (VCE) et un système d'alarme en cas de fuite dans le post détente gaz du four.

Et d'autre part, nous proposons l'application de cette démarche et sa généralisation à d'autres unités du complexe sidérurgique Arcelor Mittal de Annaba.

REFERENCES

1. V. DE DIANOUS, A.V., F. PRATS, N. RODRIGUES, D. HOURTOLOU, *ARAMIS: Développement d'une méthode intégrée d'analyse des risques pour la prévention des accidents majeurs*. 2004, INERIS. p. 106.
2. Auteurs et Experts, E.T.I., *Chaudières et fours industriels, Base documentaire*. 2014, Editions T.I.
3. Pablo, M.G., *Fours de réchauffage de la sidérurgie*. Techniques de l'ingénieur Chaudières et fours industriels, 1998. **base documentaire : TIB209DUO**(ref. article : be8843).
6. O.Salvi, E.B., *Ω-6 Eléments Importants Pour la Sécurité (EIPS)*, in *Formalisation du savoir et des outils dans le domaine des risques majeurs (DRA-35)*. 2003, INERIS-DRA: France
7. 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 *DRA*. 2002, INERIS.
8. CHAUMETTE, S., *Analyse des Risques et Prévention des Accidents Majeurs DRA 34*, in *DRA*. 2004, INERIS.
9. FAGES, F., *Étude des dangers : Analyser les risques*, in *responsable environnement*. 2015, Technique de l'ingénieur: Paris.
10. Valérie DE DIANOUS, C.B., Ahmed ADJADJ, *Programme EAT-DRA-34 - Opération j: Intégration de la dimension probabiliste dans l'analyse des risques – partie 2 : données quantifiées* in *DRA*. 2005, INERIS: paris.
11. Anousone, C., *Méthodes de modélisation des explosions de gaz*. Techniques de l'ingénieur Risques d'explosion, 2013. **base documentaire : TIB157DUO**(ref. article : se5068).
12. Y. Houilleau, L., *Guide des méthodes d'évaluation des effets d'une explosion de gaz à l'air libre*, DRA, Editor. 1999, INERIS.
13. C. Delvosalle, C.F., A. Pipart, *Deliverable D.1.C.Report presenting the final version of the Methodology for the Identification of Reference Accident Scenarios"*. 2004, ARAMIS Project - 5th Framework Program of the European Community,. p. 59 pages + 15 annexes.
14. H.Andersen, J.C., A.Dandrieux, B. Debray, V.De Dianous, N.J.Duijm, C.Delvosalle, C.Fievez, L.Goossens, R.T.Gowland, A.J.Hale, D.Hourtolou, B.Mazzarotta, A.Pipart, E.Planas, F.Prats, O.Salvi, J.Tixier., *ARAMIS final user guide* 2004, comission européen de la recherche.
16. T. Bedford, P.H.A.J.M.v.G., *Safety and Reliability: Proceedings of ESREL* European Safety, 2003. **2**.

ANNEXES

Annexe 1: Tableaux de l'APR

Annexe 2 : Classification des équipements

Annexe 3: Les arbres des défaillances

Annexe 1

Tableaux élaborés sur site de l'APR

zone 61500 :FOUR													
N°	Produit ou équipement	situation de danger	causes	conséquence	F	G	NR	mésure de sécurité existante	F'	G'	NR'	recommandations	
	gallerie électrique	court circuit	qualité des cable	incendie grave	2	4	Red	isolation	1	4	Yellow	suivie de l'état d'isolation	
	cave à huile	Fuite ou diverssement	huile sur terre	blessure	2	3	Yellow		2	3	Yellow		
	table de chargement	intervention en fct	désalignement billets	blessure	2	2	Yellow	instruction travail	1	2	Green		
	four	fuite					Red				Yellow		
	deforneuse	intervention lors du fonctionnement	désalignement billets	blessure	1	2	Red	instruction travail	1	2	Red		
	ventilateur d'air de combustion	mauvais débit d'air	moteur- bouchage de conduite	incident four et blessure	1	4	Red	instrument de regulation et detecteurs	1	2	Yellow		
	ventilateur extraction fumée tirage forcé	surpression four	vanne papillon- bouchage-moteur		1	4	Yellow	instrument de regulation et detecteurs	1	2	Yellow		
	poste détente	fuite	corrosion - défaillance vanne-cause externe		2	4	Green	revetement-regulation -SIS	2	2	Green		

Tableaux élaborés sur site de l'APR

zone 61600: Train de laminage													
N°	Equipement	Situation de danger	Causes	Conséquence	F	G	NR	Mesures de sécurité existantes	F'	G'	NR'	Recommandations	
R12	ENSEMBLE CASSETTES 455 et 445 et 436 = 16 cages	Défaillance réducteur	Détérioration des roulements ou cassure de la denture de la cage à pignon	Arrêt prolongé de l'installation	2	3		Visite quotidienne	1	3		Contrôle préventif pour suivi d'état - capteur de température paliers	
R13	FAUSSES CAGES	Projection de barre	Différence de vitesse ou qualité des barres	Effet domino sur autre équipement ou blessure de personnel	4	2		-Homologation des soudeurs - Procédure d'utilisation de chalumeaux	1	2			
R14	FORMEURS DE BOUCLES	Mauvaise qualité des barres	Divers	Panne de l'équipement	4	1			4	1			
R15	C8 CISAILLE CSI50	Projection de métal	Détérioration des roulements	Blessure, Perte de produit	4	2		- Protection intégré - Maintenance préventive	2	1			

Tableaux élaborés sur site de l'APR

zone 61700: REFROIDISSEMENT "ZONE BARRES"												
N°	Produit ou équipement	situation de danger	causes	conséquence	F	G	NR	mésure de sécurité existante	F'	G'	NR'	recommandations
61703	gallerie électrique	court circuit	qualité des cable	incendie grave	2	4		isolation	1	4		suivie de l'état d'isolation
61724	C41 CISAILLE VMC40	blessure	mauvaise coupe de caisaile C41		2	4		protection mécanique électrique	2	1		
61741	VR43 (VOIE A ROULEAUX COOLING BED)	blessure	mauvaise coupe de caisaile C41		2	4		protection mécanique électrique	2	1		respect de mesure de sécurité
61742	FM43 FM 44 FREINS MAGNETIQUES	projection metal chaud (V++)	friens	blessure	2	4		protection mécanique électrique	2	2		
61744	RM44 RATEAUX MOUVANTE	blesure grave	présence de personnel anormal	défat humaine	1	4		verrouillage d'accés	1	1		
61748	VR47 (VOIE A ROULEAUX SORTIE COOLING)	presence d'intervenant	coinssement barre necessite intervention	blessure grave	1	3		instruction de travail				
61765	C50CISAILLE FROID VMTS8 A	projection metal	presence de personne lors de fonctionnement	blessure	1	4		instruction de travail	1	4		respect de mesure de sécurité

Tableaux élaborés sur site de l'APR

zone: EXPEDITION 61800												
N°	Equipement	Situation de danger	Causes	Conséquence	F	G	NR	Mesure de sécurité existante	F'	G'	NR'	Recommandations
R23	Galerie électrique	Court-circuit	Qualité des câbles	Incendie grave	2	4	NR	Isolation	1	4	NR'	Suivi de l'état d'isolation
R24	VRM 51 voix à rouleaux magnétique	Fonctionnement normal	Présence anormale de personnel	Blessures	2	3	NR	Instruction de travail	1	3	NR'	
R25	VR51 (voie à rouleaux sortie c50)	Fonctionnement normal	Présence anormale de personnel	Blessures	2	2	NR	Instruction de travail	1	2	NR'	
R26	BR52 bras de levage rotatif	chute de poids due à la défaillance	Vitesse	Mort	2	4	NR	Instructions	1	4	NR'	
R27	VR53 (voie à rouleaux aligneurs)	Fonctionnement normal	Présence anormale de personnel	Blessures	2	2	NR	Instruction de travail	1	2	NR'	
R28	transporteur a chaine TC54	Fonctionnement normal	Présence anormale de personnel	Blessures	2	2	NR	Instruction de travail	1	2	NR'	
R29	TC55 (2eme ripeur transversal a chaine)	Fonctionnement normal	Présence anormale de personnel	Blessures	2	2	NR	Instruction de travail	1	2	NR'	
R30	FF65 (dispositif formation faisceaux)	Fonctionnement normal	Présence anormale de personnel	Blessures	2	2	NR	Instruction de travail	1	2	NR'	
R31	LG71 N°1ligatireuse N°1	Fonctionnement normal	Présence anormale de personnel	Blessures	2	2	NR	Instruction de travail	1	2	NR'	

Annexe 2 :

Typologie des équipements considérée dans MIMAH (rapport 2004 BCRD.INERIS)

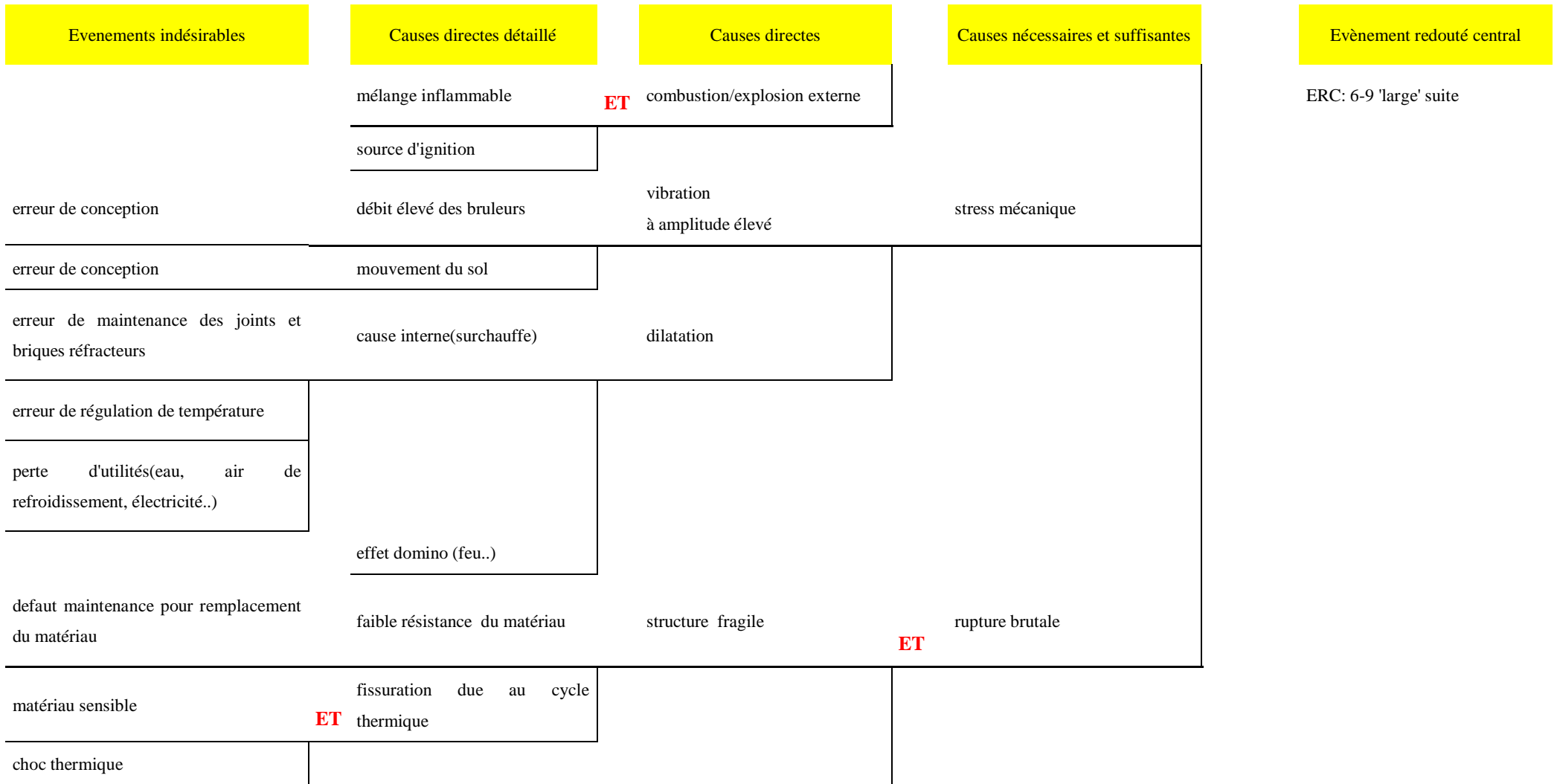
Numéros	Type d'équipement	Définition
Unité de stockage		
EQ1	Stockage en vrac solide	Stockage de substances sous forme solide (poudres ou billes). Les substances y sont stockées en vrac ou en silos (les stockages en sous forme de sacs ne font pas partie de cette catégorie)
EQ2	Stockage de solides en petits contenants	Stockage de solides sous forme de petits contenants ou réservoirs de capacité inférieure à 1 m ³ .
EQ3	Stockage de liquides en petits contenants	Stockage de liquides sous forme de petits contenants ou réservoirs de capacité inférieure à 1 m ³ .
EQ4	Stockage sous pression	Réservoirs de stockage à température ambiante et à une pression supérieure à 1 bar. La pression est celle du fluide à saturation ou peut être celle d'un gaz inerte. La substance peut être un gaz liquéfié sous pression (deux phases en équilibre) ou un gaz sous pression (une phase gaz).
EQ5	Stockage à pression supérieure à la pression de saturation	Réservoirs de stockage fonctionnant à température ambiante à une pression supérieure à 1 bar. La pression est exercée par un gaz inerte par exemple et maintient le stockage à une pression supérieure à sa pression de saturation. Le stockage contient une substance en phase liquide.
EQ6	Stockage atmosphérique	Stockage à pression et température ambiante, contenant un liquide. La substance peut être un gaz liquéfié sous pression (deux phases en équilibre) ou un gaz sous pression (une phase gaz).
EQ7	Stockage cryogénique	Stockage fonctionnant à pression atmosphérique (ou moins) et basse température. La substance est un gaz liquéfié réfrigéré.
Unité de chargement ou déchargement		
EQ8	Equipement de transport sous pression	Equipement de transport à température ambiante et pression supérieure à 1 bar (pression exercé par la substance elle-même).
EQ9	Equipement de transport atmosphérique	Equipement de transport à pression et température ambiante comportant une substance liquide.
Réseau de canalisation		
EQ10	Canalisation	Canalisations entre deux unités, les canalisations dans l'unité sont liées aux divers équipements
Equipements de process		
EQ11	Stockage intermédiaire dans le procédé	Equipement de stockage dans l'unité (peut être stockage sous pression, cryogénique..)
EQ12	Equipement avec réactions chimiques	Equipement avec réaction chimique, par exemple réacteur.
EQ13	Equipement séparation physique ou chimique	Equipement séparation physique ou chimique (par exemple colonne de distillation, filtres, sécheurs..).
EQ14	Equipement de production et fourniture d'énergie	Equipement de production et fourniture d'énergie (par exemple fours, chaudières..)
EQ15	Equipement de conditionnement	Equipement dédiés au packaging des substances (exclut les packages eux-mêmes)
EQ16	Autres équipements	Autres équipements (pompes..)

Annexe 3 : Les arbres des défaillances

Tableau 1: Arbres des défaillances pour ERC6 -9 de diamètre Large

Evènements indésirables	Causes directes détaillé	Causes directes	Causes nécessaires et suffisantes	Evènement redouté central
erreur de commande	défaillance de briqué	défaillance bruleur pilote	ET absence de flamme	ERC: 6-9 'large'
perte des utilités (d'électricité)			(phase de démarrage)	
erreur de transmission de signal			défaillance débitmètres	
erreur de maintenance	commande fausse et /ou faute de contrôle de signal			
perte des utilités (eau, électricité..)	faux signal du capteur			
erreur de transmission	autre erreur humaine			
vitesse dépassé du ventilateur d'air	sur-compression	cause sur-compression		
blocage de la conduite	défaillance régulation de circuit fumée			
défaillance de régulation	pression interne élevé			
faux signal du capteur	erreur de transmission			
erreur de commande de vanne papillon avale	défaillance de moteur extracteur de fumée			
défaillance de moteur extracteur de fumée				

Tableau 2: Arbres des défaillances pour ERC6 -9 de diamètre Large (suite)



Evènements indésirables

Causes directes détaillé

Causes directes

Causes nécessaires et
suffisantes

Evènement redouté central

Tableau 3: Arbre des défaillances pour ERC6 -9 de diamètre moyen

erreur de maintenance	vanne trop sensible	vanne de sécurité et/ou dispositif de sécurité	ouverture fonctionnelle	ERC: 6-9 'moyen'
erreur de conception	fonctionnement normal			
erreur d'installation/calibrage				
erreur humaine	fausse information sur l'opération d'inertage	ET opération commence quand l'inertage fonctionne		
faux signal du capteur	erreur de procédure de fermeture			
erreur d'interprétation				
erreur de transmission				
command/control de signal incorrect				
faux signal du capteur	erreur d'information de contenue	fausse partie déclenche avec effet dangereux		
erreur humaine				
faux signal du capteur				
erreur d'interprétation				
erreur transmission				
erreur humaine				

Tableau 4: Arbre des défaillances pour ERC6 -9 de diamètre moyen (suite)

Evènements indésirables	Causes directes détaillé	Causes directes
désobéissance volontaire	travail consciencieux sur la partie gaz	
intervention malveillante		
manque d'information sur le process	fausse information	vanne ouverte/fermée par erreur
erreur de procédure		
environnement corrosif	corrosion	vanne bloqué
origine électrique		
débit élevé	érosion	
friction externe (poussière, structure..)		
erreur /manque de maintenance	défaillance électrique	
défaillance générale		
cause externe		
logiciel défectueux (virus)	défaillance de commande	
erreur Hardware		
erreur de transmission du système		
conditions agressives de l'environnement	l'Age de l'installation	dégradation de joint/ perte d'étanchéité

Causes nécessaires et suffisantes

Evènement redouté central

Tableau 5: Arbre des défaillances pour ERC6 -9 de diamètre moyen (suite)

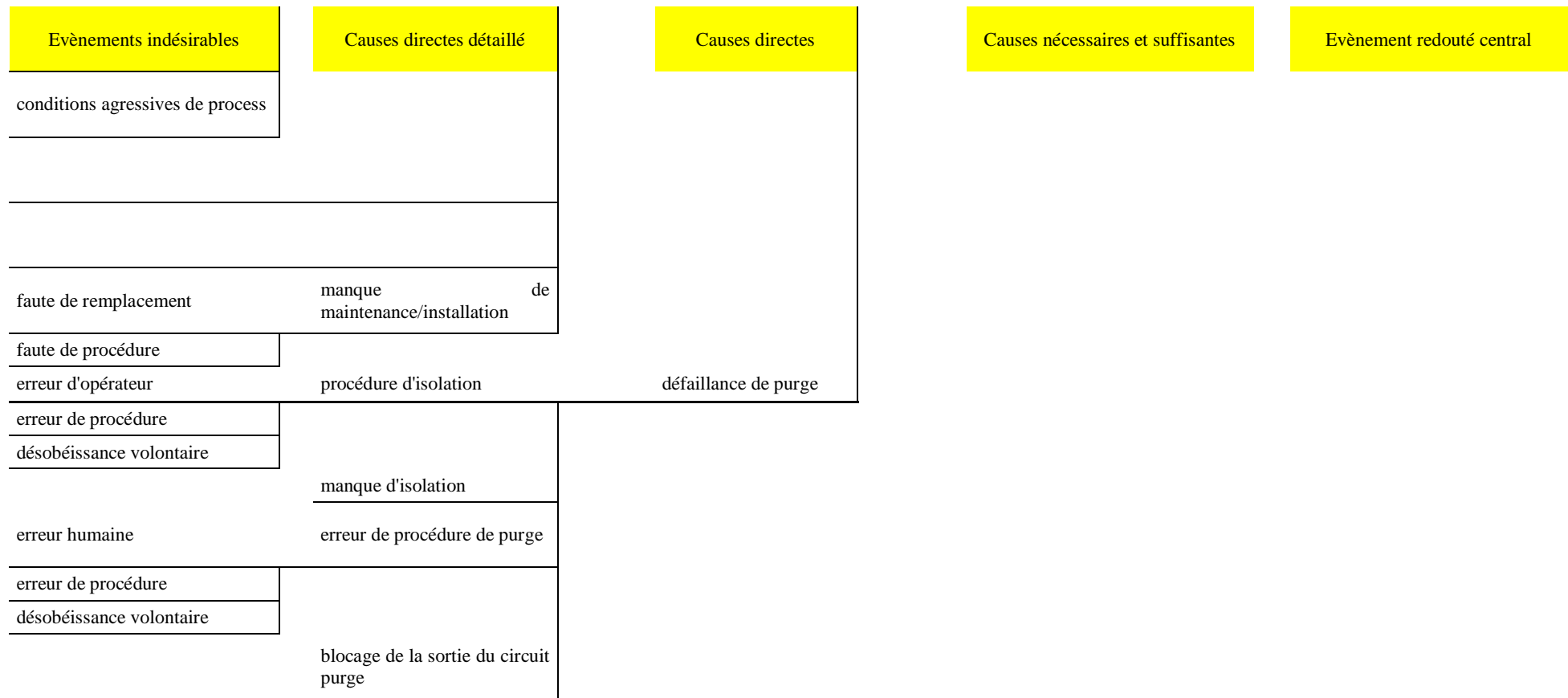


Tableau 6 : Arbre des défaillances pour ERC6 -9 de diamètre petite

Evènements indésirables	Causes directes détaillé	Causes directes	Causes nécessaires et suffisantes	Evènement redouté central
erreur de conception	friction externe avec un agent chimique	érosion	dégradation des propriétés mécaniques provoque l'incapacité à résister la surpression	ERC: 6-9 'petite'
erreur d'installation agent érosif de l'environnement	environnement corrosif		corrosion	
erreur de conception	origine électrique			
erreur d'installation erreur maintenance environnement naturel (humidité) effet domino (fuite voisine)				
erreur d'installation erreur maintenance erreur de conception	stress relié			

Tableau 3-7: Arbres des défaillances pour ERC6 -9 de diamètre petite (suite)

évènements indésirables	causes directes détaillé	causes directes	causes nécessaires et suffisantes	Evènement Redouté Central			
erreur d'installation erreur maintenance	matériaux inappropriés						
erreur de conception							
erreur d'installation erreur maintenance (remplacement)	protection insuffisante						
erreur de fabrication							
erreur de conception							
erreur d'installation erreur maintenance (remplacement)	matériau sensible				ET fatigue		
erreur de fabrication							
erreur de conception							
erreur d'installation							

Tableau 3-8: Arbres des défaillances pour ERC6 -9 de diamètre petite (suite)



TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 CONTEXTE GÉNÉRAL, PROBLÉMATIQUE ET MÉTHODOLOGIE ...	3
1.1 Présentation de l'industrie sidérurgique	3
1.1.1.La métallurgie	3
1.1.2. La sidérurgie	4
1.2 Présentation d'ARCELORMITTAL Algérie	4
1.2.1.Procédé de la sidérurgie.....	6
1.3 Problématique.....	8
1.4 Objectifs et méthodologie.....	9
CHAPITRE 2 NOTIONS DE BASE : METHODES D'ANALYSE DES RISQUES.....	10
2.1 Concepts et définitions	10
2.1.1Notion de danger et de dommage	10
2.1.2 Notion de risque.....	10
2.2 Identification des scenarios d'accidents majeurs.....	12
2.3 Méthodes d'analyse des risques classiques	13
2.4. Méthode ARAMIS	18
2.5. Sécurité fonctionnelle et fonction de sécurité	23
2.5.1. Sécurité intégrale	23
2.5.2. Sécurité Fonctionnelle	23
2.5.3. Fonction de sécurité.....	23
2.5.4. Intégrité de sécurité.....	23
2.5.5. Niveau de confiance ou niveau d'intégrité de sécurité (SIL : <i>Safety Integrity Level</i>)	24
2.6. Étude des effets du phénomène d'explosion de gaz	25
2.6.1.Description du phénomène	25
2.6.2.Modélisation des effets d'une explosion de gaz	27
CHAPITRE 3 CHAPITRE 3 ANALYSE DES RISQUES	30
3.1. Présentation de l'unité d'étude	30
3.1.1. Présentation de l'unité d'étude (LRB).....	30
3.1.2 Le procédé de fabrication.....	32

3.2. Analyse Préliminaire des Risques : APR	33
3.2.1 Méthodologie	33
3.3. ARAMIS (<i>Accidental Risk Assessment Methodology For Industries</i>).....	37
3.3.1. Opération A : Identification des scénarios d'accident.....	37
3.3.1.1.Opération A1 : Méthode MIMAH (<i>Méthodologie for the Identification of Major Accident Hazard</i>)	44
Etape A1a : Identification par équipement les évènements Redouté Centraux :.....	45
Etape A1b : Elaboration des arbres de défaillances pour chaque ERC :.....	46
Etape A1c élaboration des arbres des évènements :	59
3.3.1.2.Opération A2 : MIRAS (Method for the Identification of Reference Accident Scenarios).....	62
Etape 1 : Collecte des données	63
Etape 2: Choix entre l'étape 3 et 4 :	63
Etape 3.A : Estimation des fréquences d'occurrence des évènements et des causes	63
Etape 3.B : Identification des fonctions et des barrières de sécurité	64
Etape 3.C: évaluation du niveau de confiance des barrières.....	69
Etape 3.D. calcul de la probabilité d'occurrence de l'ERC	74
Etape 5: Calcul des fréquences des phénomènes dangereux (PD)	75
Etape 6: Estimation de la classe de gravité des phénomènes dangereux (PD)	79
...Etape 7: utilisation de la matrice de risque pour identifier le scénario d'accident de référence.....	80
3.3.2. Opération B : Etude de la sévérité des phénomènes dangereux	82
3.3.2.1 Seuils des effets	82
3.3.2.2.Indice de sévérité :	83
3.4.Interprétations et recommandations.....	94
CONCLUSION.....	95
REFERENCES.....	97
ANNEXES.....	98