

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

École Nationale Polytechnique



Département : Maîtrise des risques industriels et environnementaux

Filière : QHSE-GRI

Enterprise : Lafarge Ciment de M'Sila

Mémoire de projet de fin d'études

pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en QHSE-GRI

**MAÎTRISE DES RISQUES PAR APPROCHE DE
SÛRETÉ DE FONCTIONNEMENT
CAS : LAFARGE CIMENT DE M'SILA, ALGERIE**

Radhwane BEN KHALED

Sous la direction de : M^r. Abdelmalek CHERGUI et M^r. Amin BENMOKHTAR

Présenté et soutenu publiquement le 21/06/2017

Composition du jury :

Président	M ^r . Bouzid BENKOUSSAS	Professeur, ENP
Rapporteur 1	M ^r . Abdelmalek CHERGUI	Professeur, ENP
Rapporteur 2	M ^r . Amin BENMOKHTAR	Maître assistant ENP
Examineur 1	M ^r . Aboubakr KERTOUS	Maître assistant ENP
Examineur 2	M ^r . Tarek Mohamed ATTOUCHI	Maître assistant ENP

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

École Nationale Polytechnique



Département : Maîtrise des risques industriels et environnementaux

Filière : QHSE-GRI

Enterprise : Lafarge Ciment de M'Sila

Mémoire de projet de fin d'études

pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en QHSE-GRI

**MAÎTRISE DES RISQUES PAR APPROCHE DE
SÛRETÉ DE FONCTIONNEMENT
CAS : LAFARGE CIMENT DE M'SILA, ALGERIE**

Radhwane BEN KHALED

Sous la direction de : M^r. Abdelmalek CHERGUI et M^r. Amin BENMOKHTAR

Présenté et soutenu publiquement le 21/06/2017

Composition du jury :

Président	M ^r . Bouzid BENKOUSSAS	Professeur, ENP
Rapporteur 1	M ^r . Abdelmalek CHERGUI	Professeur, ENP
Rapporteur 2	M ^r . Amin BENMOKHTAR	Maître assistant ENP
Examineur 1	M ^r . Aboubakr KERTOUS	Maître assistant ENP
Examineur 2	M ^r . Tarek Mohamed ATTOUCHI	Maître assistant ENP

ENP 2017

Dédicaces

J'ai le grand honneur de dédier ce travail à :

Ma très chère mère

Mon très cher père

Mes très chers frères

Ma chère Sœur

Tous les membres de ma famille,

Ainsi qu'à tous mes amis

REDOUANE

Remerciements

Mes remerciements s'adressent tout d'abord à ALLAH Le Tout Puissant pour la force qu'il m'a donnée pour atteindre mon objectif et arriver où j'en suis à présent.

Le présent rapport n'aurait pas pu voir le jour sans la contribution de nombreuses personnes à qui j'aimerais adresser mes vifs remerciements :

À Monsieur O.MESAGIER, Safety Manager LAFARGE Algérie pour m'avoir donné la chance d'effectuer mon projet au sein de LAFARGE et m'avoir accompagné tout le long de son déroulement.

À Monsieur A. CHERGUI Professeur à l'ENP et À Monsieur A. BENMOKHTAR Maître-Assistant à l'ENP pour leur disponibilité, leur présence et leurs conseils qui ont contribué à l'exceptionnel encadrement dont j'ai eu l'occasion de bénéficier.

À Monsieur B. BENKOUSSAS Professeur à l'ENP, en qualité de président du jury, Monsieur A. KERTOUS Maître-assistant à l'ENP et Monsieur T. Attouchi Maître-assistant à l'ENP en tant qu'examineurs pour l'effort prodigué afin de corriger et d'apporter la touche finale au projet.

Je remercie également les employés de l'usine de M'Sila qui ont contribué de près ou de loin à mon intégration au niveau de l'usine et à la réalisation de ce projet.

Je tiens aussi à adresser mes remerciements les plus sincères à toute l'équipe pédagogique qui nous a accompagnés tout au long de notre formation à l'École Nationale Polytechnique pour la qualité de l'enseignement prodigué et l'engagement dont ils ont fait preuve.

Enfin, j'adresse mes plus sincères remerciements à tous mes proches et amis, qui m'ont toujours soutenue et encouragée au cours de la réalisation de ce mémoire.

À toutes ces personnes, je présente mes remerciements, mon respect et ma gratitude.

ملخص

تهدف هذه الدراسة إلى التحكم في المخاطر الرئيسية المحتملة الموجودة في مصنع الإسمنت بالمسيلة وذلك باستعمال المقاربة بسلامة العمل، وللقيام بذلك، تم تقسيم العمل إلى ثلاثة أجزاء: الجزء الأول يتعلق بسياق المشروع من خلال لمحة عامة عن عملية إنتاج الإسمنت بالمصنع، مراجعة الحوادث سواء في هذا المصنع أو في مختلف المنشآت المماثلة على مستوى العالم، وصف لمختلف مراحل المنهجية المتبعة في العمل ولمحة نظرية لمختلف الأدوات المستعملة في تحليل المخاطر.

يتناول الجزء الثاني تطبيق مختلف طرق تحليل المخاطر الكمية والنوعية لتقدير وتيرة الخطر، ذلك باستعمال برنامج PHAST لتقدير شدة الضرر الناجم عن هذه المخاطر. وفي الأخير نتطرق إلى مختلف التدابير التقنية المقترحة والحكم على مدى نجاعتها من خلال مقارنة وتيرة الخطر المتبقية في السيناريو مع وتيرة الخطر المعمول بها في شركة لافارج وذلك باستعمال طريقة تحليل طبقات الحماية، بهدف التقليل من وتيرة الأخطار الرئيسية وشدة الأضرار الناجمة عنها في مصنع الإسمنت.

الكلمات المفتاحية: الإسمنت، لافارج، تحليل المخاطر، سلامة العمل، تحليل طبقات الحماية، PHAST، نظام سلامة مجهز.

ABSTRACT

The objective of this work is to control the major risks that present in the cement plant of M'Sila with dependability approach. In order to achieve this, the work was divided into three parts.

The first, concerns the contextualization of the project through an overview of the cement manufacturing process, a review of major accidents that happen on the site and around the world, a description of the main process followed in the methodology of work and finally a theoretical review of the tools used in the risk analysis. The second part deals with the application of qualitative analysis methods for risk identification and quantitative methods to estimate the frequency of the risk. In addition, it was found necessary to use PHAST software to estimate the severity of the effects. The final section outlines the most essential step in the risk control process, it is based on the security technical measures and to judge if they are adequate by comparing the residual occurrence frequency of the scenario with the target frequency obtained by a criterion of acceptability appropriate to LAFARGE by using the LOPA method that were proposed in order to reduce the probability and the severity of the major risks in the cement plant.

Keywords: Cement, LAFARGE, Risk Analysis, Dependability, LOPA, PHAST, Safety Instrumented System.

RÉSUMÉ

Le présent travail a pour objectif la maîtrise des risques majeurs au niveau de la cimenterie de M'Sila par approche de sûreté de fonctionnement. Il est divisé en trois parties : La première partie porte sur la mise en contexte du projet à travers un aperçu sur le procédé de fabrication du ciment au niveau de la cimenterie, une revue des accidents survenus de par le monde et sur le site, une description du processus de maîtrise suivi par la méthodologie du travail et enfin une revue théorique sur les outils d'analyse des risques utilisés. La seconde partie traite l'application des méthodes d'analyses qualitatives et quantitatives pour l'identification et l'estimation de la fréquence des risques et l'utilisation du logiciel PHAST pour l'estimation de la gravité des effets.

La dernière partie expose l'étape la plus essentielle du processus de maîtrise des risques. Il s'agit de proposer des mesures techniques de sécurité et de comparer la fréquence d'occurrence résiduel du scénario avec la fréquence cible obtenu par un critère d'acceptabilité propre à LAFARGE afin de réduire la probabilité et la gravité du risque au niveau de la cimenterie et ceci par l'emploi de la méthode LOPA.

Mots clés : Ciment, LAFARGE, Analyse des risques, Sûreté de fonctionnement, LOPA, PHAST, Système instrumenté de sécurité.

TABLE DES MATIERES

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES FIGURES

LISTE DES ABREVIATIONS

INTRODUCTION GENERALE	13
------------------------------------	----

CHAPITRE 1: CONTEXTE GÉNÉRAL, PROBLÉMATIQUE ET MÉTHODOLOGIE

1.1 Généralité sur les ciments	16
1.2 Marché du ciment dans le monde	17
1.3 Principaux exportateurs et importateurs du ciment dans le monde	18
1.4 Présentation du groupe LAFARGE	19
1.5 LAFARGE Algérie	21
1.6 Lafarge Ciment de Msila (LCM)	22
1.7 Procédé de fabrication du ciment.....	23
1.8 Accidents dans l'industrie du ciment	27
1.9 Problématique et Méthodologie.....	28
1.9.1 Problématique.....	28
1.9.2 Objectifs de l'étude	29
1.9.3 Méthodologie	29

CHAPITRE 2: MÉTHODES D'ANALYSE UTILISÉES EN SÛRETÉ DE FONCTIONNEMENT

2.1 Notions fondamentales.....	34
2.1.1 Danger	34
2.1.2 Risque.....	34
2.1.3 Fiabilité.....	34
2.1.4 Maintenabilité.....	35
2.1.5 Disponibilité	35
2.1.6 Sécurité.....	35
2.2 Sûreté de fonctionnement	35

2.3	Données de fiabilité	37
2.3.1	Bases de données.....	37
2.3.2	Retour d'Expérience (L'historique du système)	37
2.4	Méthodes fondamentales d'une approche SdF	38
2.4.1	Méthodes déductives et inductives.....	38
2.4.2	Méthodes qualitatives, semi-quantitatives et quantitatives	39
2.4.3	Méthodes pour défaillance indépendante ou pour défaillances combinées	40
2.4.4	Méthodes déterministes et probabilistes	40
2.5	Nœud papillon.....	42
2.5.1	Arbre de défaillances (AdD)	43
2.5.2	Arbre d'événement (AdE).....	44
2.6	Analyse fonctionnelle	45
2.6.1	Méthode SADT (Structure Analysis Design Technique).....	47
2.9	Analyse Pareto	49

CHAPITRE 3: APPLICATION DES METHODES D'ANALYSE

3.1	Identification fonctionnelle du système de production du ciment	52
3.1.1	Analyse fonctionnelle par la méthode SADT	52
3.1.2	Décomposition fonctionnelle	57
3.2	Identification des systèmes critiques	60
3.2.1	Analyse de Pareto :.....	63
3.3	Identification et estimation des facteurs de risque	66
3.3.1	Broyeur vertical (VRM).....	66
3.3.2	Atelier cuisson.....	72

CHAPITRE 4: MODÉLISATION DES EFFETS

4.1	Description du phénomène « Explosion »	86
4.2	Régimes d'explosion.....	87
4.3	Limites d'explosivité	88
4.3.1	Limite Inférieure d'Explosivité (LIE).....	88

4.3.2	Limite Supérieure d'Explosivité (LSE).....	88
4.4	Description du Modèle TNT	88
4.5	Sélection du phénomène dangereux : Explosion	89
CHAPITRE 5: ACTIONS DE MAÎTRISE DES RISQUES		
5.1	Impact économique de l'arrêt de production	96
5.2	Impact économique de défaillance de la butée hydraulique	97
5.3	Proposition des solutions technologiques	97
5.4	Layer Of Protection Analysis (LOPA)	98
5.5	Différents types de barrières de sécurités	99
5.6	Notion de couche de protection indépendante	99
5.7	Mise en œuvre de la méthode LOPA	100
5.8	Système instrumenté de sécurité (SIS)	105
5.9	Calcul d'allocation du niveau d'intégrité de sécurité du SIL : graphe de risque	106
5.10	Détermination du niveau d'intégrité de sécurité (SIL) du SIS associé au four rotatif	108
5.11	Proposition d'un système instrumenté de sécurité (SIS)	110
5.12	Impact du SIS dans la réduction du risque de l'explosion.....	114
CONCLUSION GÉNÉRALE.....		117
Références bibliographiques.....		119
ANNEXES.....		121

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1-1 : Principaux groupes cimentiers dans le monde	18
Tableau 1-2: Exportateurs du ciment dans le monde (2006 - 2015)	19
Tableau 1-3: Importateurs du ciment dans le monde (2006 - 2015)	19
Tableau 2-1: Principales méthodes de base de SdF	41
Tableau 3-1 : Grille de niveau de production	61
Tableau 3-2 : Grille de cotation maintenabilité	61
Tableau 3-3 : Grille de cotation durée d'intervention	61
Tableau 3-4 : Grille de cotation détectabilité	62
Tableau 3-5 : Grille de cotation de fréquence	62
Tableau 3-6 : Cumul du pourcentage de Score (VRM).....	63
Tableau 3-7 : Cumul du pourcentage de Score (Atelier cuisson).....	63
Tableau 3-8 : Données de l'AdD : Défaillance de réducteur de commande	67
Tableau 3-9 : Données de l'AdD : Détérioration des équipements internes	68
Tableau 3-10 : Données de l'AdD : Défaillance de l'élévateur de farine	69
Tableau 3-11 : Barrières de protection	70
Tableau 3-12 : Données de l'AdD : Défaillance Ventilateur " l'ID Fan "	75
Tableau 3-13 : Données de l'AdD : Bourrage du cyclone	76
Tableau 3-14 : Données de l'AdD : Défaillance de la Butée hydraulique	78
Tableau 3-15 : Probabilités de défaillance des barrières de protection	78
Tableau 4-1 : Paramètres d'entrés pour le logiciel PHAST	90
Tableau 4-2 : Seuil de suppression.....	91
Tableau 4-3 : Effets de suppression sur l'homme et les structures	92
Tableau 5-1 : Tableau de synthèse du Scénario N° 01 selon CCPS.....	101
Tableau 5-2 : Tableau de synthèse du Scénario N° 02 selon CCPS.....	103
Tableau 5-3 : Etalonnage des paramètres du graphe de risque	107
Tableau 5-4 : Paramètres choisis pour la méthode graphe de risque étalonnée	108
Tableau 5-5 : Définition des niveaux SIL	109
Tableau 5-6 : Donnée de fiabilité des éléments du SIS	112
Tableau 5-7 : Résultat donnée par le logiciel GRIF	113
Tableau 5-8 : Tableau de synthèse du Scénario N° 03 selon CCPS.....	114

LISTE DES FIGURES

Figure 1-1 : Évolution du marché mondial du ciment	17
Figure 1-2: Carte des implantations de LAFARGE dans le monde	20
Figure 1-3 : Différents produits de Lafarge en Algérie	22
Figure 1-4 : Vue d'ensemble de la cimenterie de M'Sila	22
Figure 1-5: Schéma de fabrication du ciment	24
Figure 1-6: Vue d'un four horizontal rotatif	25
Figure 1-7: Vue d'un broyeur du clinker	26
Figure 1-8 : Processus méthodologique de l'étude.....	31
Figure 2-1 : Diagramme de Farmer	36
Figure 2-2 : Principe d'une démarche inductive	38
Figure 2-3 : Principe d'une démarche déductive	39
Figure 2-4 : Schéma d'un nœud papillon	42
Figure 2-5 : Structure d'un arbre de défaillances	44
Figure 2-6 : Structure d'un arbre d'évènement	45
Figure 2-7 : Boîte utilisée par SADT	48
Figure 2-8 : Diagramme type SADT avec détail sur le niveau inférieur	48
Figure 2-9 : Processus de construction d'un diagramme de Pareto	49
Figure 2-10 : Représentation du diagramme de Pareto	50
Figure 3-1 : Modèle SADT de la Fabrication du ciment.....	54
Figure 3-2 : Modèle SADT détaillé de la Fabrication du ciment	55
Figure 3-3 : Modèle SADT de la cuisson de la farine	56
Figure 3-4 : Découpage fonctionnel de VRM	57
Figure 3-5 : Broyeur vertical (VRM)	58
Figure 3-6 : Découpage fonctionnel du four	59
Figure 3-7 : Four à 3 appuis	60
Figure 3-8 : Diagramme Pareto (VRM)	64
Figure 3-9 : Diagramme Pareto (Atelier cuisson)	64
Figure 3-10 : AdE de l'arrêt broyeur VRM.....	69
Figure 3-11 : Nœud papillon pour l'évènement « Arrêt broyeur VRM »	71
Figure 3-12 : Vue de l'extérieure de " l'ID Fan "	72
Figure 3-13 : Découpage fonctionnel de " l'ID Fan "	73
Figure 3-14 : schéma simplifié de la tour de préchauffage	75

Figure 3-15 : Composantes de la butée hydraulique	76
Figure 3-16 : AdE de défaillance de « ID FAN ».....	78
Figure 3-17 : AdE de bourrage du Cyclone.....	78
Figure 3-18 : AdE de défaillance de la butée hydraulique	79
Figure 3-19 : Nœud papillon pour l'évènement « Défaillance de ID FAN ».....	81
Figure 3-20 : Nœud papillon pour l'évènement « bourrage du Cyclone».....	82
Figure 3-21 : Nœud papillon pour l'évènement « Défaillance de la butée hydraulique».....	83
Figure 4-1 : Principales étapes dans le déroulement d'une explosion de gaz	87
Figure 4-2 : Schéma descriptif de l'explosion.....	89
Figure 4-3 : Variation de la surpression en fonction de la distance	90
Figure 4-4 : Les zones de surpression en fonction des distances de l'explosion.....	91
Figure 4-5 : Effets de surpression dans la zone (l'explosion de l'électro-filtre).	92
Figure 5-1 : Différentes couches de protection suivant LOPA	98
Figure 5-2 : Processus de sélection d'une barrière en tant que IPL suivant LOPA	100
Figure 5-3: Principe de connexion entre les deux lignes.....	101
Figure 5-4 : Butée fixe	103
Figure 5-5 : Schéma général du graphe de risque	107
Figure 5-6 : Résultat de l'application la méthode graphe de risque	109
Figure 5-7 : Composants d'un SIS	110
Figure 5-8 : Distinction entre SIS et SIF	110
Figure 5-9 : Schéma du SIS proposé	111
Figure 5-10 : Architecture du SIS proposé par GRIF.....	112
Figure 5-11 : Rapport donné par le logiciel GRIF après calcul du SIL.....	113

LISTE DES ABRÉVIATIONS

AdD	Arbre de Défaillance
AdE	Arbre d'Évènement
AF	Analyse fonctionnelle
ARAMIS	Accidental Risk Assessment Methodology for Industries in the framework of Seveso
ARIA	Analyse, Recherche et Information sur les Accidents
CCPs	Center for Chemical Process Safety
EB	Évènement de base
EI	Évènement intermédiaire
ENS	Evènement Non Souhaité
ER	Évènement redouté
ERS	Évènement redouté secondaire
GRIF	Graphiques Interactifs pour la Fiabilité
IPL	Independant Protection Layer
ITC	International Trade Centre
VRM	Vertical Raw Mill
LCM	LAFARGE Ciment M'Sila
LCO	LAFAGE Ciment Oggaz, Mascara
LIE	Limite Inférieure d'Explosivité
LOPA	Layer Of Protection Analysis
LES	Limite Supérieure d'Explosivité
PFD_{avg}	Probability of Failure on Demand average
PhD	Phénomène dangereux
PLC	Programmable Logic Controller
SADT	Structure Analysis Design Technique
SdF	Sûreté de Fonctionnement
SIF	Safety Instrumented Function
SIL	Safety Integrity Level (niveau d'intégrité du système)
SIS	Système Instrumenté de Sécurité
TNT	Tri Nitro Toluène
VCE	Vapor Cloud Explosion

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Actuellement, les industries sont confrontées à des risques qui menacent leur pérennité et remettent en cause leurs objectifs. Devant ce défi, elles doivent défendre leurs existences en instaurant une stratégie de gestion des risques et en mettant en place des méthodes d'analyse et d'évaluation de ces risques. Elles doivent aussi se conformer à la réglementation et procéder à des investissements appropriés tout en assurant la protection de l'exploitant et des populations, garantir la préservation de l'environnement et fiabiliser leurs installations pour un fonctionnement en toute sécurité.

Les exigences actuelles en matière de sécurité imposent que les installations industrielles présentent le moins de risques possibles durant leurs utilisations. C'est dans la phase de conception que l'on doit intégrer les éléments nécessaires à la sûreté de fonctionnement de ces installations. Deux approches permettent la diminution du risque : la prévention en minimisant la probabilité d'apparition d'un risque et la protection en limitant les conséquences d'un dysfonctionnement.

Les industries lourdes comme les cimenteries sont par ailleurs très intensives en capital et nécessitent de lourds investissements dans un contexte économique instable et de plus en plus concurrentiel. Les entreprises ne se contentent plus d'optimiser leurs systèmes, elles recherchent des solutions technologiques pour éviter le maximum de pannes qui provoquent la défaillance du système de production considéré comme le challenge de toute entreprise.

Les industries, comme par exemple la cimenterie et la pétrochimie, présentent des faiblesses en matière de maîtrise des risques. En 2016, 1340 incidents ont été répertoriés par la base de données ARIA [1].

Souvent, les études faites dans le cadre de gestion des risques industriels sont réalisées dans le but de la prévention et la protection contre les risques majeurs (explosions, incendies...). Ces risques sont caractérisés par une faible probabilité d'occurrence et une gravité élevée.

Cependant, pour ces industries, de nombreuses défaillances et anomalies dans les systèmes de productions peuvent être à l'origine des grandes pertes financières avec des incidences importantes à moyen et à long terme sur l'économie de l'entreprise ; même si cela ne portent pas atteinte directement à la vie humaine et à l'environnement.

L'industrie de ciment (cimenterie LAFARGE à M'Sila) se trouve quotidiennement face aux défis de la production et aussi aux conséquences des différents accidents dus à l'exploitation

de l'usine sur l'homme, le matériel et l'environnement. Il est par conséquent important de considérer les risques qu'elle présente, les potentiels de danger des matières utilisées et les pertes encourues en cas de non-maîtrise de ces risques.

L'étude réalisée dans le cadre de ce projet s'est déroulée sur le site de la société LAFARGE. Des données sur la production, le procédé de fabrication, la sécurité et la maintenance des équipements que nous avons relevés des différents départements de la cimenterie nous permettent d'avoir une idée sur la situation réelle de l'installation et d'étudier les différents scénarios possibles qui peuvent dans certaines conditions aboutir à des risques majeurs avec des conséquences graves sur le site et son environnement.

La présente étude est constituée de cinq chapitres :

- Le premier chapitre est consacré au contexte général, à la problématique abordée et à la méthodologie suivie dans la réalisation du projet.
- Le second chapitre, traite les concepts généraux de maîtrise des risques par approche de sûreté de fonctionnement.
- Le troisième chapitre est consacré à l'application des méthodes d'analyses (analyse par Arbre de Défaillances, Arbre d'Evènements et Nœud papillon) et à l'interprétation des résultats obtenus.
- Dans le quatrième chapitre nous abordons la simulation des effets des phénomènes dangereux.
- Le dernier chapitre est consacré à la proposition et à la validation des solutions techniques proposées et ce par l'utilisation de la méthode LOPA.

Et à la fin une conclusion générale et perceptive.

Chapitre 1
CONTEXTE GÉNÉRAL,
PROBLÉMATIQUE ET
MÉTHODOLOGIE

CONTEXTE GÉNÉRAL, PROBLÉMATIQUE ET MÉTHODOLOGIE

Le secteur de construction occupe actuellement une place importante dans la structure socio-économique, il contribue fortement à la croissance et au développement par la facilitation des échanges et des investissements internationaux. Constituant le principal matériau de construction des logements et des infrastructures, le ciment ou « l'or gris » est ainsi un élément vital pour la croissance et le développement économique.

Dans ce chapitre, nous allons donner un aperçu sur le marché mondial et Algérien du ciment en nous focalisant sur l'évolution de sa consommation, et présenter les pionniers de sa production, son importation et son exportation. Après quoi, une présentation du secteur d'activité du ciment qui est l'un des matériaux de construction les plus utilisés au monde s'impose, pour ensuite mettre l'accent sur le Groupe Lafarge en exposant des chiffres clé de l'activité de cette dernière.

Par la suite, nous allons nous axer sur le procédé de fabrication au niveau de l'usine de M'SILA, nous allons passer en revue quelques accidents survenus dans des cimenteries à travers le monde et en Algérie.

Enfin nous focaliserons sur la problématique posée ainsi que la démarche suivie pour atteindre les objectifs fixés pour cette étude.

1.1 Généralité sur les ciments

Le ciment vient du mot latin *coementum*, qui signifie pierre de construction, est une poudre minérale fine, principal composant du béton qui est une pâte qui se fige et durcit même sous l'eau, auquel il confère un certain nombre de propriétés, et notamment sa résistance. Il s'agit d'un matériau de construction de haute qualité, économique, utilisé dans les projets de construction du monde entier. Nous citons ces différents ciments : ciment alumineux, ciment artificiel, ciment blanc ou extra-blanc, ciment brûlé (clinker), ciment de laitier, ciment lent, ciment lourd, ciment mixte, ciment naturel, ciment portland, le ciment sulfaté [LAFARGE].

Ces différents ciments répondent à des normes précises. Ils font l'objet de contrôles réguliers et approfondis à chaque étape du processus de fabrication, garantissant ainsi la conformité de produit fini aux normes en vigueur.

Aujourd’hui, le ciment est l’un des matériaux indispensables à la construction. Un matériau qui continue à façonner le cadre de vie de millions d’hommes et de femmes, partout dans le monde. L’industrie du ciment est par ailleurs très capitalistique et nécessite de lourds investissements.

« La construction d’une nouvelle ligne de production représente un investissement supérieur à deux années de ventes à pleine capacité » [LAFARGE].

1.2 Marché du ciment dans le monde

Le marché du ciment a connu une forte croissance durant ces dernières années, principalement due à l’évolution considérable que connaît le secteur de construction dans le monde. Ainsi, en 20 ans, la consommation est passée de 1300MT en 1994 à plus de 4000MT en 2014, soit une évolution de plus de 200% avec un taux de croissance annuel de 5% (figure 1-1) [LAFARGE].

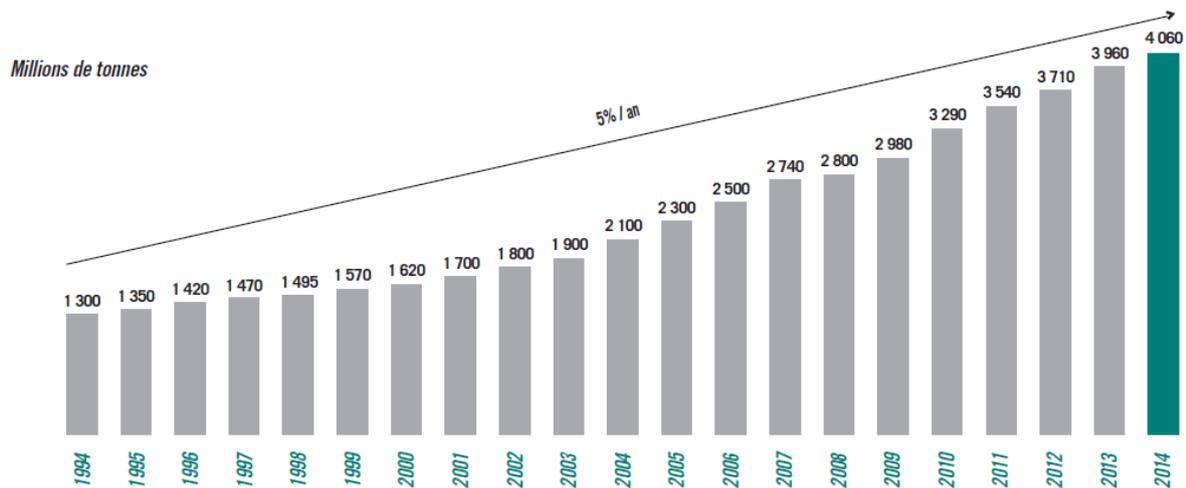


Figure 1-1 : Évolution du marché mondial du ciment [LAFARGE]

Cette croissance est constatée principalement dans les pays émergents (Europe centrale et de l’Est, Asie, Moyen-Orient et Afrique, Amérique latine) où la démographie, l’urbanisation et la croissance économique confirment les besoins en logement et en infrastructures. Ces marchés émergents absorbent aujourd’hui 90% de la consommation mondiale, la Chine détient 58% de la demande mondiale. L’Afrique, quant à elle, est considérée comme un marché d’avenir en raison de l’augmentation des constructions résidentielles alimentées par la forte croissance démographique et l’urbanisation [2].

La production du ciment a également connu une forte croissance. Elle est estimée à 4 milliards de tonnes en 2014 avec un taux de production de 107 tonnes/seconde (Tableau 1-1). Cette croissance a été principalement constatée, comme pour la demande, dans les pays émergents, où elle est passée de près de 1,4 milliards de tonnes en 1994 à 3,4 milliards de tonnes en 2011, soit une croissance de plus de 150%, principalement en Chine, qui est le premier fabricant du ciment. En ce qui concerne l’Afrique, la production est passée de 50 millions de tonnes en 2010 à 110 millions de tonnes en 2015 située principalement dans l’Afrique du Sud [2].

*Tableau 1-1 : Principaux groupes cimentiers dans le monde
(The Global Cement Directory 2016)*

Rank	Company	Country	Capacity (Mt/yr)	Plants
1	LafargeHolcim	Switzerland	286.66	164
2	Anhui Conch	China	217.20	32
3	CNBM(Sinoma)	China	176.22	94
4	HeidelbergCement	Germany	121.11	79
5	Cemex	Mexico	87.09	56
6	Italcementi	Italy	76.62	60
7	China Resources	China	71.02	19
8	Taiwan Cement	Taiwan	63.72	6
9	Eurocement	Russia	45.18	17
10	Votorantim	Brazil	45.02	41

1.3 Principaux exportateurs et importateurs du ciment dans le monde

Sur les 10 exportateurs mondiaux de ciment, nous retrouvons, la chine en première place avec 15 millions de tonnes, suivi par la Thaïlande avec 12 millions de tonnes (Tableau 1-2). Ces dix exportateurs, à eux seuls, assurent 64% du total mondial des exportations en 2015. Sur les 10 importateurs mondiaux de ciment, qui représente 38% du total mondial des importations en 2015, nous retrouvons, les Etats unis d’Amérique en première place avec 11 millions de tonnes, et l’Algérie qui occupe la sixième place avec près de 5 Million de tonnes en 2015 (Tableau 1-3).

Tableau 1-2 : Exportateurs du ciment dans le monde en MT/ans (2006 - 2015)

N°	Pays	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
01	Chine	36.129	33.009	26.039	15.591	16.162	10.609	12.007	14.541	13.908	15.755
02	Thaïlande	14.980	18.647	15.905	15.088	14.702	12.156	1.309	9.436	12.040	12.648
03	Turquie	6.831	7.887	13.726	20.365	19.010	14.397	13.634	12.363	10.995	10.712
04	Japon	10.108	9.607	10.920	10.708	10.296	9.786	9.730	8.767	9.084	10.195
05	EAU	-	1.507	0.250	-	-	-	4.185	7.676	7.663	9.358
06	Espagne	1.463	1.444	2.448	2.762	4.402	4.345	6.638	7.395	9.146	8.924
07	Corie	6.169	6.340	6.471	4.686	7.575	9.963	8.821	9.195	9.531	7.393
08	Allemagne	7.286	8.012	8.313	7.014	6.864	7.892	7.019	6.498	6.167	6.569
09	Vietnam	0.112	-	-	-	-	-	-	-	-	5.818
10	Grèce	3.354	3.742	4.390	4.248	3.937	2.176	4.337	5.571	5.743	5.196

Tableau 1-3 : Importateurs du ciment dans le monde en MT/ans (2006 - 2015)

N°	Pays	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
01	États unis	35.896	22.728	11.518	6.894	6.754	6.542	7.061	7.320	-	11.231
02	Sri Lanka	3.036	3.215	3.300	2.563	3.126	4.931	6.135	-	7.440	7.096
03	Singapore	2.986	3.845	4.400	4.783	4.430	4.682	5.723	5.812	5.906	5.968
04	Bangladesh	7.059	7.166	6.988	6.594	8.486	8.664	-	9.093	9.743	5.729
05	Oman	0.476	0.648	1.541	0.931	2.317	2.282	3.489	5.583	4.117	5.408
06	Algérie	0.598	0.387	0.229	0.395	2.602	1.361	2.812	4.428	6.029	4.771
07	Myanmar	-	-	-	-	1.095	2.333	2.884	3.568	4.288	4.478
08	Kuwait	1.930	2.168	2.747	1.723	1.966	2.363	2.762	2.722	3.423	3.972
09	Australie	1.429	1.695	2.546	1.713	2.222	2.390	2.438	2.709	3.520	3.684
10	France	3.687	4.701	4.446	3.504	3.759	4.209	3.991	3.904	4.161	3.612

Source : (ITC 2017)

1.4 Présentation du groupe LAFARGE

Lafarge est un groupe français qui produit et commercialise des matériaux de construction, principalement du ciment, des granulats et du béton, dans le monde entier. Il intègre dans sa vision la sécurité de ses employés, la performance, l'innovation et la construction durable.

En 2014, le groupe a réalisé un chiffre d'affaires qui dépasse les 12 milliards d'euros. Il est leader dans l'activité cimentière qui constitue 63,5% de son chiffre d'affaire. Quant aux activités du béton et de granulats qui constituent 35,9% de son chiffre d'affaire, il est classé respectivement deuxième et quatrième au monde [LAFARGE].

Lafarge a été créée en France aux alentours de 1833, lorsqu'Auguste Pavin de Lafarge a fondé une entreprise d'exploitation de chaux qui devient en 1930, grâce à quelques acquisitions, le premier producteur français de ciment. Dès 1864, l'entreprise commence à se développer au niveau international avec plusieurs acquisitions notamment celles de General Portland Inc. en Amérique du Nord en 1981, de Redland en 1998, du cimentier Blue Circle en 2001 et principalement celles d'Orascom Cement en 2008 qui lui a permis d'assurer une présence unique au Moyen-Orient et en Afrique [LAFARGE].

Aujourd'hui, ce groupe est devenu l'un des principaux leaders cimentiers dans le monde avec une présence dans plus de 78 pays avec 1 636 sites de production (figure 1-2).

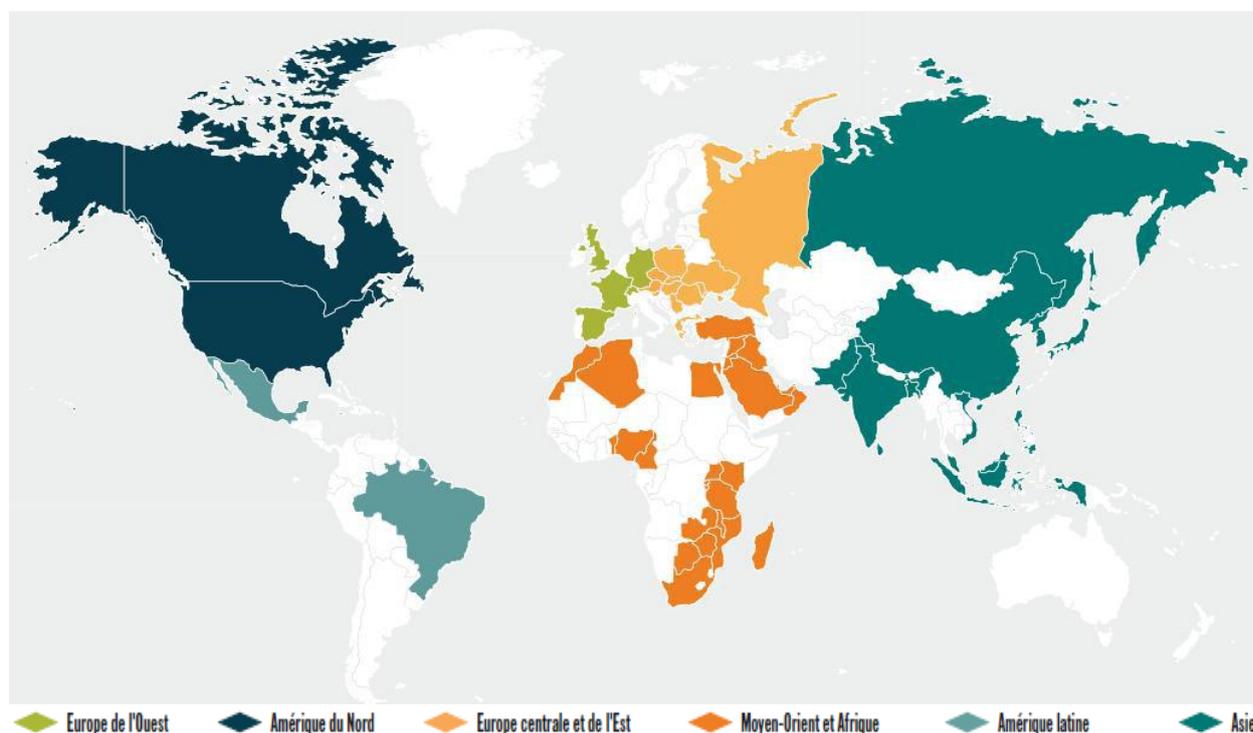


Figure 1-2 : Carte des implantations de LAFARGE dans le monde [LAFARGE]

Grace à l'acquisition d'Orascom Cement qui opérait dans sept pays notamment l'Algérie, le groupe Lafarge a pu renforcer sa présence en Algérie, et devenir un acteur principal dans le marché des matériaux de construction qui contribue à la réalisation de différents projets tels que l'Autoroute Est-Ouest, le Tramway (Alger, Oran), le barrage de Chlef et de Koudiat, le terminal de Gazier (Arzew, Skikda), l'Aéroport d'Alger, Métro d'Alger [LAFARGE].

L'annonce du 7 avril 2014 par Lafarge et Holcim (groupe suisse) d'un projet de fusion entre égaux constitue une nouvelle étape historique dans le développement du Groupe : créer le leader mondial à l'avant-garde des matériaux de construction pour mieux accompagner la croissance des marchés [LAFARGE].

1.5 LAFARGE Algérie

L'Algérie est un marché d'importance stratégique pour le groupe Lafarge dans le Bassin Méditerranéen. Le secteur de la construction est en croissance constante depuis 2000, avec d'importants besoins en matériaux de construction et solutions constructives.

Le groupe, aujourd'hui est présent en Algérie à travers toutes ses activités : ciment, granulats, béton et plâtre et emploie 2 600 collaborateurs.

Le groupe a fait son apparition en Algérie en 2002 en partenariat avec Cosider (Plâtre), une année après, elle lance l'usine M'Sila, la 1ère ligne ciment gris, puis, en 2005, elle lance la 2ème ligne ciment gris, toujours à Msila l'usine devient la plus grande d'Algérie.

En 2007, le groupe Lafarge a renforcé sa présence en rachetant des opérations d'Orascom-Cement (Usine de M'Sila & Oggaz), ensuite, il a construit la 2ème usine à Oggaz (Maskara), 1ère ligne de ciment blanc et création d'ACT (Béton & Granulats). Tandis qu'en 2008, elle acquiert 35% du capital de Meftah avec un contrat de Management de 10 ans, et inaugure la 2ème ligne de Ciment gris à Oggaz.

C'est en 2010 que Lafarge ALGERIE lance sa nouvelle gamme élargie de produits (Chamil, Matine, Mokaouem, Malaki) et inaugure le 5ème broyeur à M'Sila pour augmenter la capacité de production. En 2013 elle inaugure le « CDL » premier laboratoire de construction applicatif en Afrique.

Actuellement, Lafarge Algérie possède 03 cimenteries (M'Sila, Mascara, Biskra) gère en partenariat avec le GICA la cimenterie de Meftah, compte 25 centres de production de béton et l'enseigne de supermarché des matériaux de construction « BATISTORE », permettant un accès stable aux matériaux de construction en qualité, choix et à des prix abordables.

En Algérie, la quantité de ciment produite reste encore inférieure à la demande nationale, 21 MT sont produites chaque année, alors que la demande atteint 25 MT [LAFARGE].

La figure 1-3 présente les différents produits de Lafarge en Algérie :



Figure 1-3 : Différents produits de Lafarge en Algérie

1.6 Lafarge Ciment de Msila (LCM)

Située au niveau de la wilaya de M'Sila (figure 1-4) dans la commune de Hammam Dallah, l'usine est la propriété de Lafarge Algérie depuis 2008. L'installation génère près de 1000 emplois directs et environ 8000 emplois indirects, elle est considérée comme la plus grande cimenterie du pays.

Avec des coûts d'investissements qui dépassent (450 million \$) l'usine comporte deux lignes identiques de production, La cimenterie produit 5 MT/an qui représente près de 25% de la production nationale en ciment [LAFARGE].



Figure 1-4 : Vue d'ensemble de la cimenterie de M'Sila [LAFARGE]

1.7 Procédé de fabrication du ciment

La fabrication du ciment fait appel à de nombreuses techniques et technologies. En vue des différentes étapes par lesquelles passent les matières premières, celles-ci nécessitent le déploiement de grands moyens humains et matériels, le procédé de fabrication du ciment peut être divisé en trois grandes parties qui ont pour rôle :

- La préparation du cru ;
- la cuisson de la farine ;
- le broyage du ciment. Ces différentes étapes, illustrées sur la figure 1-5.

1.7.1 Extraction et concassage

Les matières premières sont extraites de carrières généralement à ciel ouvert. Les blocs obtenus sont réduits, en éléments d'une dimension maximale de 80 mm dans des concasseurs situés, en principe, sur les lieux mêmes de l'extraction [5].

1.7.2 Préparation de la matière première

Les grains de calcaire et d'argile sont intimement mélangés par broyage, dans des proportions définies, en un mélange très fin, le « cru ». À ce niveau, des corrections de composition peuvent être effectuées en incorporant, en faible proportion, de l'oxyde de fer, etc. Le mélange cru est préparé automatiquement en fonction de la technique de fabrication utilisée [5].

1.7.3 Le broyage

La préhomogénéisation permet d'atteindre un dosage parfait des constituants essentiels du ciment, par superposition de multiples couches. Une station d'échantillonnage analyse régulièrement les constituants et le mélange pour en garantir la régularité. À la sortie du hall de préhomogénéisation, le mélange est très finement broyé dans des broyeurs qui éliminent l'humidité résiduelle et permettent d'obtenir une poudre «la farine » présentant la finesse requise. La farine obtenue est extraite par le courant d'air chaud qui la sèche puis est acheminée dans le silo d'homogénéisation [5].

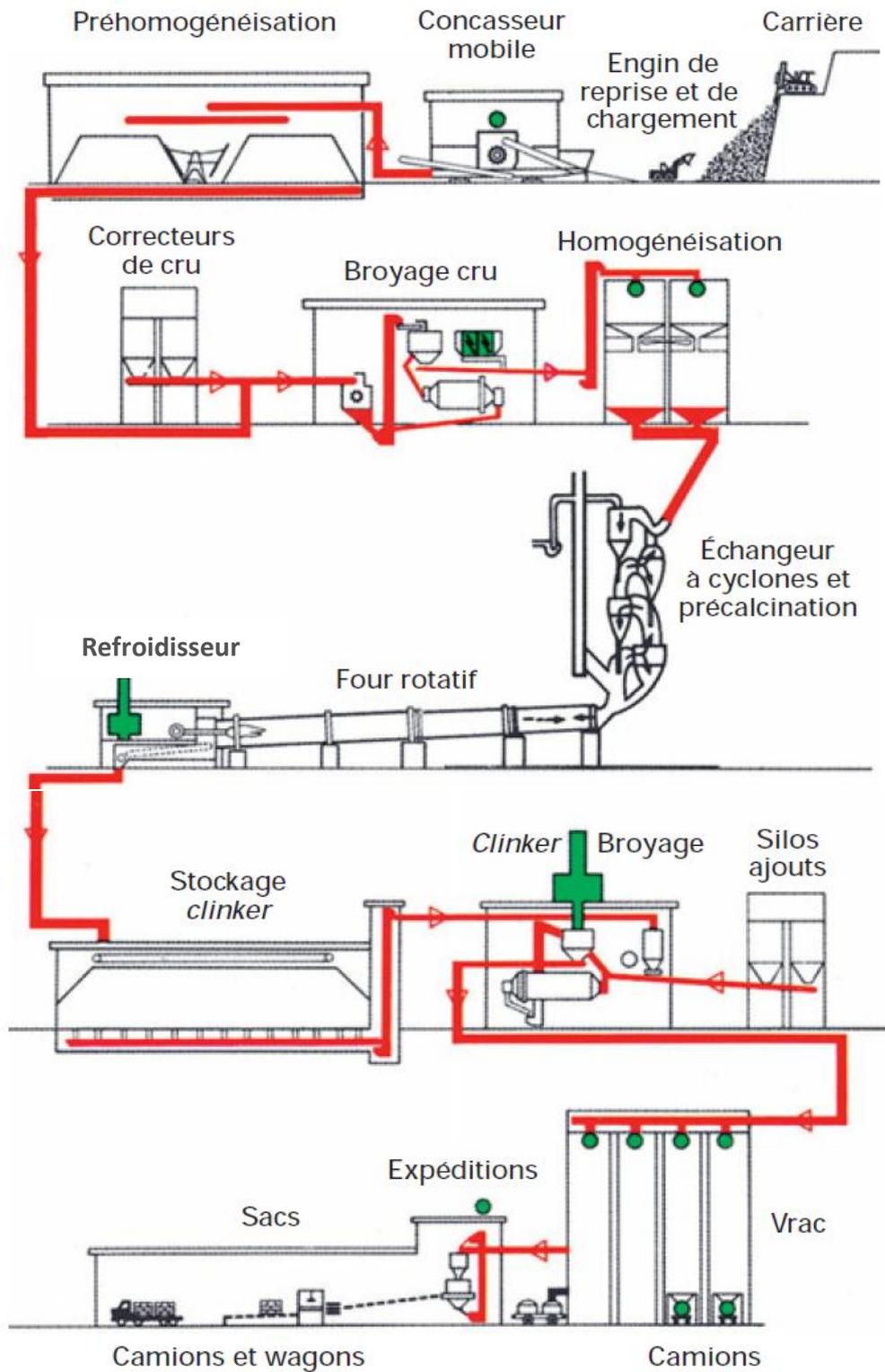


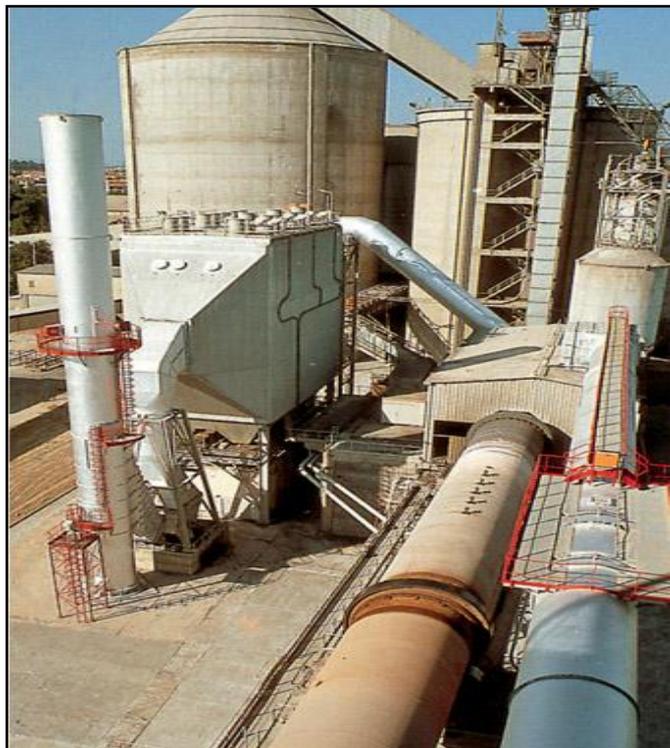
Figure 1-5 : Schéma de fabrication du ciment
[LAFARGE]

1.7.4 Cuisson de la farine

Les installations de cuisson généralement comportent deux parties :

- La tour de préchauffage comportant une série de cinq cyclones dans lesquels la farine déversée à la partie supérieure descend vers l'entrée du four rotatif. Elle se réchauffe au contact des gaz chauds provenant du four et circulant à contre-courant, et se décarbonate en partie. Une décarbonation, La farine est ainsi portée à une température comprise entre 800 °C et 1 000 °C

- Un four horizontal rotatif (figure 1-6) cylindrique en acier (avec revêtement intérieur réfractaire) de 50 à 90 m de long, de 4 à 5 m de diamètre, légèrement incliné et tournant de 1 à 3 tours/minute. La matière pénètre à l'amont du four (en partie haute) où s'achève la décarbonation, et progresse jusqu'à la zone de clinkerisation (environ 1 450 °C) [5].



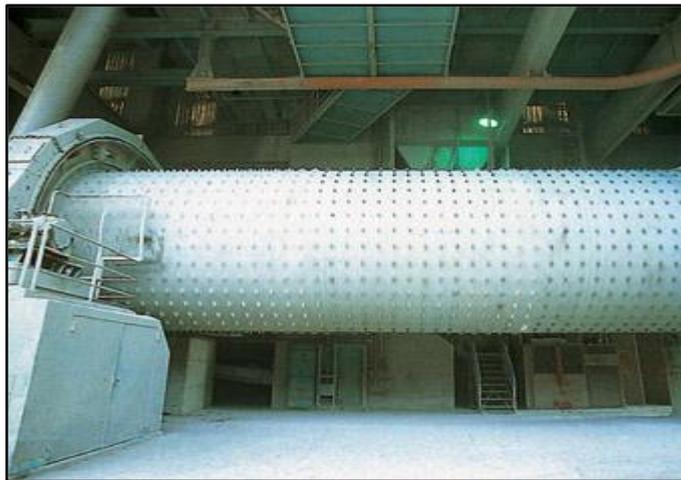
*Figure 1-6 : Vue d'un four horizontal rotatif
[LAFARGE]*

Le temps de parcours est de l'ordre d'une heure. Sous l'effet de la chaleur, les constituants de l'argile, principalement composée de silice, d'alumine et d'oxydes de fer, se combinent à la chaux provenant du calcaire pour donner des silicates et des aluminates de calcium. Tout en améliorant la qualité des produits, les industriels ont fortement réduit, au cours des dernières années, la consommation d'énergie nécessaire à la cuisson, de plus en plus apportée par des combustibles de substitution.

En outre, l'industrie cimentière contribue aussi à la protection de l'environnement en valorisant les sous-produits industriels, inutilisables pour d'autres emplois. Les rejets des usines sont sensiblement inférieurs aux normes [5].

1.7.5 Broyage du clinker

À la fin de la cuisson, la matière brusquement refroidie se présente forme de granules qui constituent le clinker. Celui-ci, finement broyé avec du gypse pour régulariser la prise (figure 1-7) [5].



*Figure 1-7 : Vue d'un broyeur du clinker
[LAFARGE]*

1.7.6 Fabrication des ciments

Le ciment courant est fabriqué par mélange et broyage de clinker et d'autres constituants minéraux avec une certaine quantité d'un sulfate de calcium, comme le gypse, nécessaire pour réguler la prise [5].

1.8 Accidents dans l'industrie du ciment

Le retour d'expérience est une étape clé dans la préparation d'une maîtrise des risques. La collecte des informations des accidents ayant déjà lieu dans des industries pareilles, nous donne une idée sur les problèmes majeurs de cette industrie. Une synthèse crédible et objective des informations permet d'orienter notre étude vers les principaux problèmes.

Dans ce qui suit, nous citons des exemples d'accidents survenus sur des installations similaires :

- Cimenterie « *LA COURONNE* » en France : le 16 Octobre 2014 à 02h30, un feu s'est déclaré dans la tour de préchauffage de 5 étages. Un opérateur effectuant une ronde aperçoit la fumée et donne l'alerte. Le contremaître en salle de contrôle stoppe la ligne de cuisson, déclenche le plan de sécurité interne et alerte les pompiers. Ces derniers éteignent l'incendie vers 09 h. L'un d'eux, brûlé est transporté à l'hôpital. Une fuite de matière chaude (farine crue à 700°C) à la base du cyclone de la tour est à l'origine de cet incendie. La matière a ensuite coulé dans les étages inférieurs au travers des caillebotis et a enflammé des câbles électriques et des flexibles. Le feu s'est ensuite propagé le long des câbles. Le four a été arrêté pendant 8 jours pour des interventions. [ARIA]

- Cimenterie « *M'Sila* » en Algérie : le 20 Novembre 2013 à 13h30, L'arrêt du four a été déclenché par interlock (commande automatique) de pression au niveau du cône cyclone. Au moment de l'arrêt du ventilateur de tirage " ID Fan ", une explosion au niveau de la conduite cyclone a été entendue et une fuite de matière s'est déclenchée d'une porte de débouillage installée sur la conduite du cyclone 5. Il y a eu un dégagement de matière chaude et la formation d'un nuage de poussière important qui s'est dirigé vers la deuxième ligne de production. Un départ d'incendie a été provoqué par la matière chaude au niveau des câbles du portique gaz du calcinateur et des commandes des air-chocs. L'accident n'a causé aucune perte humaine, mais il a conduit à l'arrêt de la production et la détérioration des équipements électriques [LAFARGE].

- La cimenterie « *Safi* » en Maroc, le 12 Mai 2013, dix personnes ont subi des brûlures, plus ou moins graves, provoqué par « un nuage de poussière chaude qui est sortie de l'équipement et a touché les personnes se trouvant à proximité », indique, le communiqué de « *Ciments du Maroc* » :

« Suite à la remise en service, après un entretien programmé, de la ligne de cuisson de notre cimenterie de Safi, une accumulation de matière chaude s'est formée, à l'entrée du refroidisseur (équipement de refroidissement de la matière cuite à la sortie du four) et a bloqué le circuit » précise le communiqué, ajoutant qu'il a ensuite été procédé à l'arrêt du four pour la démolition et l'évacuation de cette matière qui, entretemps, a énormément durci » [LAFARGE].

- Cimenterie « *Meftah* » en Algérie : le 17 novembre 2009 à 22h, une explosion due à une accumulation de gaz au niveau de la tour de cyclones, située dans la tour de préchauffage. Des dégâts matériels ont été enregistrés avec aucune perte humaine ni même de blessures n'ont été signalé, ce qui a conduit à l'arrêt du four [LAFARGE].

Nous constatons clairement que selon les exemples cités précédemment que les accidents sont survenus dans la zone de cuisson et que les éléments touchés sont le four et la tour de préchauffage. Il est noté que ces accidents ont comme conséquences des pertes économiques importantes ; et contrairement aux autres industries les conséquences en matière de l'atteinte à l'homme est moins importantes.

1.9 Problématique et Méthodologie

1.9.1 Problématique

Par un retour d'expérience en relation avec l'industrie du ciment, nous remarquons que les systèmes les plus critiques dans le procédé de fabrication sont :

1. Le broyeur vertical (VRM) : est un élément sensible et où nous avons un historique riche en termes de pannes et défaillances.
2. La zone de cuisson : cette partie constitue la base de la cimenterie et présente ainsi un potentiel de danger très important en matière des températures élevées et la présence des éléments dangereux (gaz naturel).

La résolution du problème de la fiabilité des systèmes de production du ciment notamment au niveau de broyeur et du four se fait en répondant à un ensemble de questions :

- Comment pouvons-nous juger la fiabilité de ces systèmes et à quelle nous faisons face ?
- Quelles sont les conséquences possibles d'une défaillance de ces systèmes, et à quel niveau de la gravité pouvons-nous être affectés ?

- La situation de l'installation est-elle suffisantes et dans le cas échéant quelles sont les propositions que nous pouvons faire ?

1.9.2 Objectifs de l'étude

L'objectif de notre travail est l'établissement d'une démarche adéquate d'analyse des risques pour une meilleure maîtrise de ces derniers avec des propositions techniques si nécessaire et qui peuvent être défini comme suit :

- Définition du système de production du ciment, de ses fonctions et de ses composants ;
- Identification des équipements les plus critiques présents dans le système de production ;
- Définition des scénarios d'accidents probables ;
- Proposition de mesures de maîtrise dans une démarche de gestion des risques.

1.9.3 Méthodologie

La méthodologie que nous avons adopté pour atteindre l'objectif général de cette étude, reprend parfaitement l'enchaînement du processus méthodologique de maîtrise des risques majeurs, en passant par les objectifs intermédiaires prédéfinis pour la conduite du projet, doit apporter des éléments de réponse à notre problématique.

Étape 1 : Etude fonctionnelle du système

Cette étape définit le système sur lequel portera l'étude. Elle comprend :

- **L'analyse fonctionnelle par la méthode SADT** : SADT est présentée comme méthode de spécification fonctionnelle des systèmes qui entre dans le cadre du domaine de la sûreté de fonctionnement elle sera appliquée dans notre cas dans le but de d'écrire le système et le décomposer et définir ses principales fonctions ainsi les interactions entre elles.
- **Décomposition fonctionnelle** : un découpage fonctionnel des systèmes en sous-systèmes pour faciliter l'analyse des risques.

Étape 2 : Identification des systèmes critiques

En concertation avec les responsables de la maintenance de l'entreprise et en exploitant l'historique riche des machines nous allons utiliser une analyse PARETO. Cette méthode nous servira à déterminer les éléments critiques de notre système.

Étape 3 : Analyse des risques

Dans cette étape constitue l'étape d'analyse des risque dans sa globalité puisque c'est durant cette dernière que nous allons appliquer toute les méthodes d'analyse quantitative qui permettent de compléter notre étude, et ce, dans le but d'arriver à faire ressortir tous les scénarios plausibles susceptible de se produire.

Les outils utilisés dans cette étape sont :

- **Arbre De Défaillance (AdD)** : identification des combinaisons de causes qui pourraient être à l'origine d'un évènement non souhaité ;
- **Arbre D'Évènement (AdE)** : définition du type de phénomène qui peut se produire après l'échec ou le succès des barrières de sécurité ;
- **Nœud papillon** : le principal intérêt du nœud papillon est qu'il permet de visualiser l'ensemble des chemins conduisant des événements de base jusqu'à l'apparition des phénomènes dangereux, parmi les avantages de la « *Nœud de papillon* » est la mise en place des moyens de préventions et de protections peut alors être décidée pour diminuer la criticité des points faibles du système.
- **Modélisation des effets** : à l'aide du logiciel PHAST nous allons modéliser le phénomène dangereux (PhD) le plus probable.

Étape 4 : Réduction du risque

- **Layer Of Protection Analysis (LOPA)** : Nous introduisons la notion des couches de protection traitée à travers l'application de la méthode semi-quantitative LOPA, Suite aux résultats de cette méthode nous pouvons juger que les barrières de sécurité qui ont été mises en place sont suffisantes ou pas.
- **Graphe de risque étalonné** : détermination du niveau d'intégrité de sécurité du système (SIL) ;

Les étapes de la méthodologie sont schématisées dans la figure 1-8.

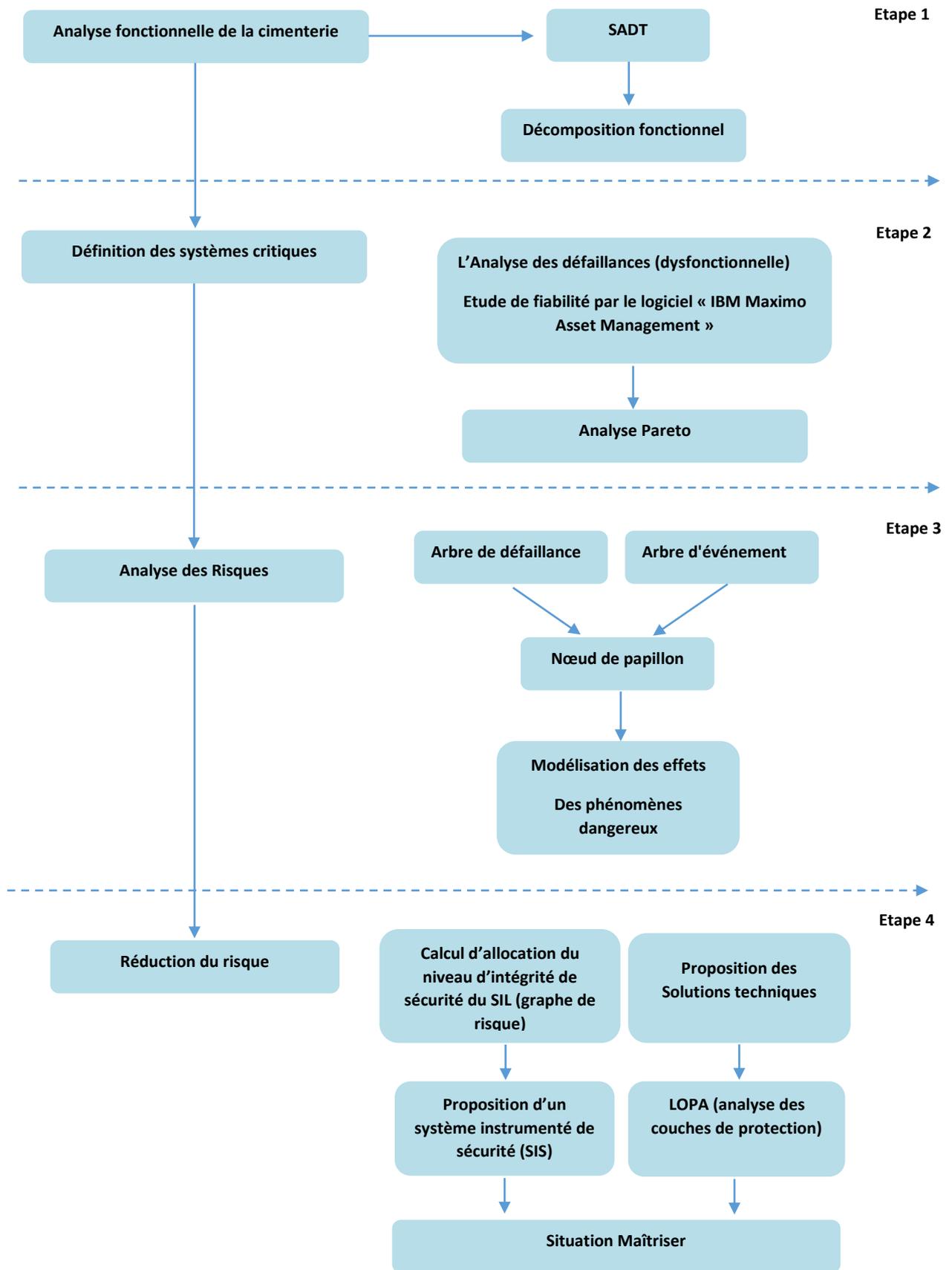


Figure 1-8 : Processus méthodologique de l'étude

Ce chapitre nous a permis, d'une part, de retracer l'évolution de la demande et de la production du ciment dans le monde et en Algérie et d'autre part, la présentation du groupe Lafarge en particulier Lafarge Algérie.

De plus, ce chapitre nous a permis de situer la problématique posée dans son contexte et la méthodologie proposée pour la maîtrise des risques au niveau de la cimenterie de M'Sila.

Le chapitre suivant sera consacré aux notions de maîtrise des risques selon une approche sûreté de fonctionnement.

Chapitre 2

**MÉTHODES D'ANALYSE
UTILISÉES EN SÛRETÉ DE
FONCTIONNEMENT**

MÉTHODES D'ANALYSE UTILISÉES EN SÛRETÉ DE FONCTIONNEMENT

Tout système industriel est susceptible de générer des risques de nature variée. Gérer un risque est un processus itératif qui a pour objet d'identifier, d'analyser et de réduire au maximum le risque ou de le maintenir dans les limites acceptables. La gestion des risques est une des composantes fondamentales de la gestion d'un système. L'analyse de risques est une étape clé du processus globale de gestion des risques. Sa réalisation nécessite de mettre en œuvre une démarche structurée systématique. C'est ce à quoi sont destinées les méthodes que nous présentons dans ce chapitre. Celles-ci sont applicables à une variété de risques d'origine technique, en particulier aux risques industriels majeurs.

Dans le présent chapitre, nous allons mettre en avant l'explication du processus de maîtrise des risques suivit dans notre étude ainsi que les outils d'analyse utilisés dans chaque étape.

2.1 Notions fondamentales

2.1.1 Danger

La notion du danger est l'un des concepts de base sur lesquels focalisent les industriels. À cet effet on donne la définition « *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* » [9].

2.1.2 Risque

Une des définitions du risque est donnée par Alain Villemeur : « *mesure d'un danger associant une mesure de l'occurrence d'un événement indésirable et une mesure de ses effets ou conséquences* » [10].

2.1.3 Fiabilité

Aptitude d'une entité à accomplir les fonctions requises dans des conditions données pendant une durée donnée. « *Aptitude d'un système, d'un matériel à fonctionner sans incidents pendant un temps donné* » [11].

2.1.4 Maintenabilité

Aptitude d'une entité à être remise en état, par une maintenance donnée, d'accomplir des fonctions requises dans les conditions données. [11]

2.1.5 Disponibilité

Aptitude d'une entité à être en état d'accomplir les fonctions requises dans les conditions données. [11]

2.1.6 Sécurité

Aptitude d'une entité à ne pas causer de dommages dans des conditions données ou à ne pas faire apparaître, dans des conditions données, des événements critiques ou catastrophiques. [11]

2.2 Sûreté de fonctionnement

La sûreté de fonctionnement (SdF) n'est pas un but en soi, mais un moyen ou un ensemble de moyens : des démarches, des méthodes, des outils et un vocabulaire. Le but qui impose le recours à la sûreté de fonctionnement est plus reconnaissable sous le terme de « maîtrise des risques ».

La démarche, le raisonnement « sûreté de fonctionnement » s'appuient sur quelques notions de base qui se sont précisées au cours de l'évolution et qui continuent à s'affiner, Parcourir ce vocabulaire de base est donc une introduction classique à la sûreté de fonctionnement.

La SdF est une aptitude d'une entité à satisfaire une ou plusieurs fonctions requises dans des conditions données. Nous noterons que ce concept peut englober la fiabilité, la disponibilité, la maintenabilité, la sécurité, la durabilité... ou des combinaisons de ces aptitudes. Au sens large, la SdF est considérée comme la science des défaillances et des pannes [11].

La SdF est souvent définie comme :

- fiabilité, disponibilité, maintenabilité et sécurité ;
- science des défaillances ;
- maintien de la qualité dans le temps.

En SdF, il s'agit d'identifier les événements indésirables, d'évaluer la fréquence de leurs survenues et de quoi elle dépend, de prendre ses décisions en fonction de leurs impacts sur le triplet « événement, fréquence, gravité » qu'on appelle risque.

La façon la plus parlante d'exprimer le risque est de placer chaque événement redouté étudié sur un plan dans un repère dont les axes sont la fréquence f et la gravité g . Nous pouvons représenter n'importe quel choix d'équivalence de risques en traçant des lignes qui joignent l'ensemble des points qu'on considère également acceptables. Par exemple, l'hypothèse à propos de la criticité revient à prendre pour lignes isorisques les hyperboles.

Parmi les lignes isorisques, une est particulièrement intéressante : celle qui relie les points à la frontière entre l'acceptable et l'inacceptable. Son tracé, sa forme, est l'expression très lisible des critères d'acceptation des risques. Un risque placé au-dessus d'elle doit être réduit pour devenir acceptable :

- soit on en réduit la fréquence, c'est faire de la **prévention** ;
- soit on en réduit la gravité, c'est faire de la **protection**.

Ce diagramme fréquence-gravité, aussi appelé diagramme de « Farmer » (Figure 2-1), est la façon la plus pratique d'illustrer et de communiquer sur le risque [11].

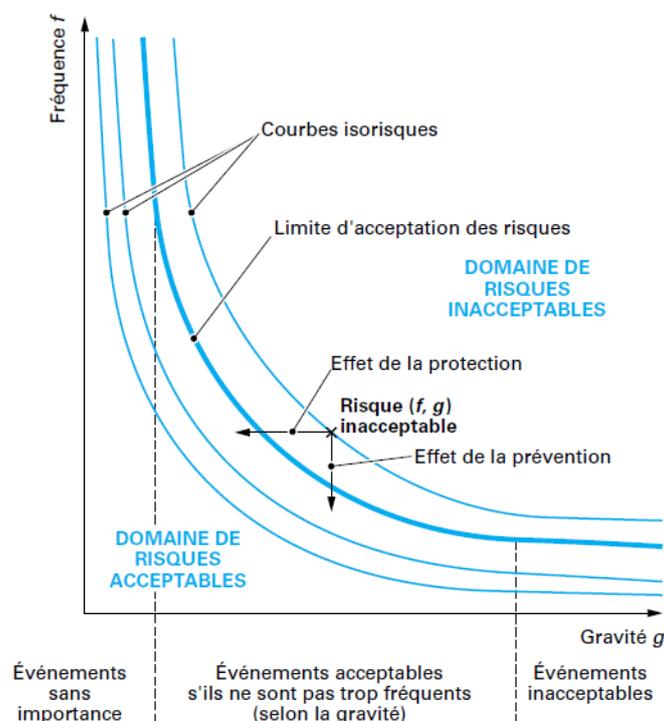


Figure 2-1 : Diagramme de Farmer [11]

2.3 Données de fiabilité

Une démarche de SdF exploite des connaissances. Sans connaissances, il n'y a pas d'analyse de risques possible. Ces connaissances sont de nature qualitative (fonctionnements des systèmes, sensibilités aux agressions, enchaînements causes conséquences...) et de nature quantitative ou chiffrée : ce sont, par exemple, des taux de défaillance de composants, des fréquences de telles ou telles conditions de température, de crue, etc., des probabilités d'événements, des probabilités conditionnelles, des coûts d'événements, des étendues d'atteinte à l'environnement, etc.

Deux démarches spécifiques à la sûreté de fonctionnement jouent un rôle essentiel : les bases de données et le retour d'expérience. Bien souvent, manquant de données nécessaires, Nous organisons des essais et des tests pour produire de la connaissance, de l'expérience, donc des données [11].

2.3.1 Bases de données

La possession ou l'accès aux données de fiabilité ou de maintenabilité sont une ressource extrêmement précieuse pour évaluer des risques.

Ces données peuvent être propres au système dont on a la charge et il faut constituer soi-même sa base de données. L'emprunt à d'autres bases de données qu'on sait adapter à son cas, les essais préalables, le retour d'expérience sont les sources principales.

Certains fournisseurs accompagnent leurs fournitures de données des lois de fiabilité, des taux de défaillance et, dans certains cas, s'engagent sur celles-ci.

Bien des industriels constituent leurs propres bases de données et les enrichissent par des échanges avec d'autres entreprises [12].

2.3.2 Retour d'Expérience (L'historique du système)

Le principe du retour d'expérience (REX) est d'améliorer sa connaissance du système par l'observation, le recueil, l'analyse, le traitement des informations relatives au fonctionnement réel du système, à son environnement, à son impact sur son environnement.

Améliorer sa connaissance, ce peut être la compléter, l'enrichir, la rectifier, mais c'est certainement réduire les incertitudes et augmenter la confiance sur la connaissance que l'on a du système [12].

Nous considérons généralement que le REX consiste à remplir des bases de données avec les caractéristiques des événements redoutés qui se produisent, au fur et à mesure de leurs survenues. Une démarche de REX est bien plus que cela et, pour être la plus utile et la moins coûteuse, ne consiste pas forcément à recueillir systématiquement ces descriptions d'événements [11].

2.4 Méthodes fondamentales d'une approche SdF

2.4.1 Méthodes déductives et inductives

Basée sur l'induction logique définie par le dictionnaire de l'Académie des Sciences comme la « *manière de raisonner qui consiste à inférer du particulier au général* », les méthodes inductives sont basées sur une analyse « montante » où l'on identifie toutes les combinaisons d'événements élémentaires possibles qui peuvent entraîner la réalisation d'un événement unique indésirable : la défaillance. À partir des événements initiateurs on identifie les combinaisons et enchaînements d'événements pouvant mener jusqu'à l'accident. On dit généralement que l'on part des causes pour identifier les effets. Dans la terminologie anglo-saxonne, cette méthode est appelée « Bottom-Up approach ». La figure 2-2 représente le principe de la démarche inductive [13].

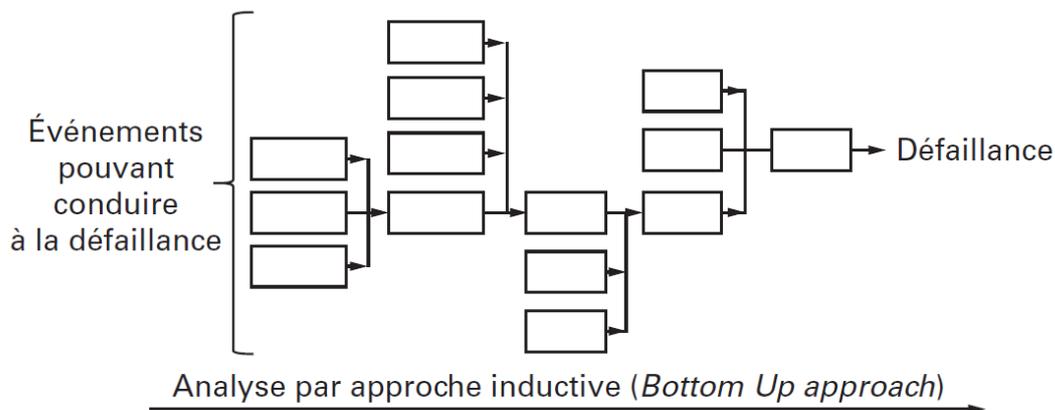


Figure 2-2 : Principe d'une démarche inductive [13]

Pour les méthodes déductives basées sur la déduction logique qui est un procédé par lequel « on va du général au particulier », suivant le dictionnaire de l'Académie des Sciences, la démarche est inversée puisque l'on part de l'événement non désiré, la défaillance, et l'on recherche ensuite par une approche descendante toutes les causes possibles. Le système est supposé défaillant et

l'analyse porte sur l'identification des causes susceptibles de conduire à cet état. On part alors des défaillances pour remonter aux causes.

Il s'agit à partir de l'événement majeur d'identifier les combinaisons et enchaînements successifs d'événements pour remonter jusqu'aux événements initiateurs (comme le montre la figure 2-3). Dans la terminologie anglo-saxonne, cette méthode est appelée « Top-Down approach » [13].

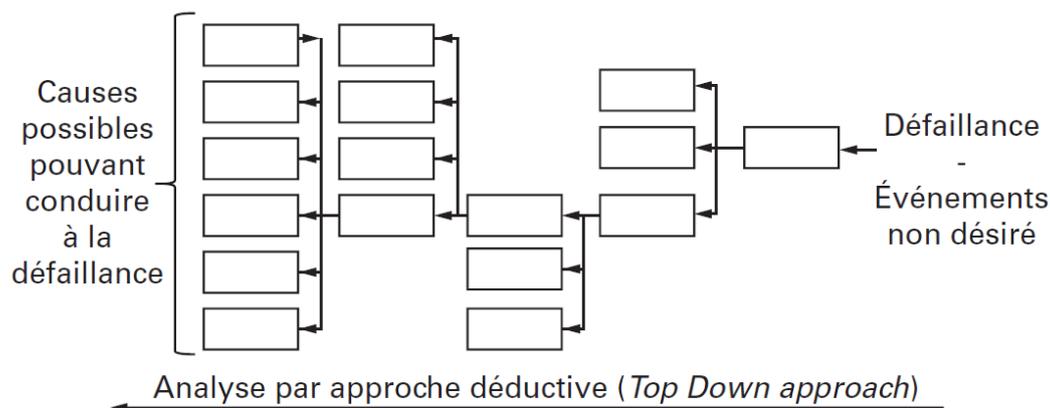


Figure 2-3 : Principe d'une démarche déductive [13]

2.4.2 Méthodes qualitatives, semi-quantitatives et quantitatives

Les méthodes qualitatives d'analyse des risques sont utilisées dans la phase préliminaire d'évaluation des risques. Elles consistent à identifier l'ensemble des situations dangereuses susceptibles de survenir. Une analyse qualitative a pour objectif de fournir principalement une appréciation. Une analyse qualitative s'utilise dans des domaines où les connaissances sont peu formalisées ou difficilement quantifiables.

L'analyse qualitative définit les conséquences, leurs probabilités d'occurrence et les risques en les qualifiant par exemple avec des mots tels que : très faible, faible, moyenne ou forte. Elle peut combiner les conséquences et leurs probabilités d'occurrence et évaluer le risque à l'aide de critères qualitatifs. Il est possible également d'utiliser une matrice de hiérarchisation qualitative de risques [13].

Les méthodes semi-quantitatives utilisent des échelles de notation numériques pour les probabilités d'occurrence et leurs conséquences. Les échelles de notation peuvent être linéaires ou logarithmiques. Elles combinent ensuite ces valeurs en utilisant des formules spécifiques au secteur industriel concerné [13].

Les méthodes quantitatives permettent de quantifier et d'analyser les conséquences des défaillances, les fréquences et les risques. Les méthodes quantitatives, pour être fiables et crédibles, doivent faire appel aux données de REX de très bonne qualité. Il est important de souligner que les valeurs fournies sont des estimations dont la précision dépend des données utilisées et qu'elles doivent être considérées comme telles.

2.4.3 Méthodes pour défaillance indépendante ou pour défaillances combinées

Les méthodes analytiques peuvent se classer en deux catégories en fonction du nombre de défaillances considérées ; les méthodes à défaillance indépendante considèrent uniquement le cas où une seule défaillance se produit sur l'équipement. Les résultats des analyses sont fonction des caractéristiques de cette seule défaillance (taux de défaillance, probabilité d'occurrence, etc.). Inversement, les méthodes d'analyses qui considèrent les probabilités d'occurrence de défaillances pouvant survenir simultanément sont appelées méthodes pour défaillances combinées [13].

2.4.4 Méthodes déterministes et probabilistes

Dans le domaine particulier des installations à risques industriels majeurs où nous souhaitons prévenir ou réduire les causes d'un accident technologique (nucléaire, chimie, etc.). Il existe deux grandes approches pour l'évaluation quantitative du risque industriel : l'approche déterministe et l'approche probabiliste.

Les méthodes déterministes tiennent compte des défaillances réelles des équipements et quantifient les conséquences pour différentes cibles comme les personnes, les installations.

Les méthodes probabilistes sont basées sur l'évaluation de la probabilité d'occurrence des situations dangereuses ou de la survenance d'un accident potentiel en fonction des probabilités d'occurrence des défaillances des équipements.

Les méthodes déterministes mettent l'accent sur l'évaluation et le contrôle des conséquences d'un accident, tandis que les méthodes probabilistes se concentrent sur l'estimation de la probabilité d'occurrence de cet accident.

L'approche déterministe consiste en effet à vérifier que les conséquences sont maîtrisées, tandis que l'approche probabiliste se propose de démontrer que la probabilité est maintenue à des valeurs considérées comme acceptables. Ces deux approches sont donc fondamentalement différentes puisqu'elles sont deux interprétations distinctes de la notion de risque [13].

Le tableau 2-1 présente les principales méthodes d'une approche SdF :

Tableau 2-1 : Principales méthodes de base de SdF [13]

Méthodes	Approche logique	Domaines d'applications	Objectifs	Défaillances envisagées	Approche quantitative/qualitative	Niveau de complexité
APR	Inductive	Toutes installations simples	Identification des dangers, évaluation et classement des risques associés et proposition des mesures de couvertures des risques	Indépendantes	Qualitative	+
AMDEC	Inductive	Systèmes techniques	Analyse des modes de défaillances, de leurs effets et de leur criticité	Indépendantes	Quantitative	+++
HAZOP	Inductive	Procédés thermo hydrauliques	Identification des dysfonctionnements de nature technique et opératoire pouvant conduire à des événements non souhaités	Indépendantes	Qualitative	++
What-if	Inductive	Toutes installations simples	Inventaire des équipements pouvant être défaillants et évaluation de la probabilité et la gravité de leurs effets	Indépendantes	Semi-quantitative	+
Arbres de défaillance (quantitatifs)	Déductive	Toutes installations	Évaluation de la probabilité d'occurrence d'un événement redouté à partir de l'occurrence des événements qui peuvent le produire	Combinées	Quantitative	+++
Blocs diagramme de fiabilité (quantitatifs)	Inductive	Toutes installations	Détermination de la fiabilité globale d'un système à partir de la fiabilité des composants élémentaires	Combinées	Quantitative	+++
Barrières	Inductive Déductive	Toutes installations	Analyse des barrières ayant pour but la réduction de la probabilité d'occurrence et/ou des effets et conséquences d'un événement non souhaité dans un système	Combinées	Quantitative	++++
Arbres d'événement	Inductive Déductive	Toutes installations	Détermination de l'ensemble des séquences accidentelles susceptibles de se réaliser suivant que les barrières de protection remplissent ou non leur fonction de sécurité	Combinées	Quantitative	+++
Nœud papillon	Inductive Déductive	Toutes installations	Visualisation et quantification des scénarios d'accident qui pourraient survenir en partant des causes initiales de l'accident jusqu'aux conséquences sur les éléments vulnérables environnants	Combinées	Quantitative	++++
MOSAR	Inductive Déductive	Toutes installations	Analyse des risques d'un système à différents niveaux d'analyse et mise en évidence des moyens de maîtrise des risques	Combinées	Quantitative	++++
LOPA	Inductive Déductive	Toutes installations	Évaluation du niveau de maîtrise de risque avec les barrières existantes sur un système et détermination éventuelle de nouvelles barrières	Quantitative	Quantitative	++++

2.5 Nœud papillon

Le concept du nœud papillon a été introduit par la compagnie ICI (Imperial Chemical Industries). Après l'accident survenu sur la plate-forme pétrolière Piper Alfa, la compagnie Royal Dutch/Shell a développé cette technique d'analyse au début des années 1990 afin d'améliorer la sécurité sur de telles installations. L'utilisation de la méthode du nœud papillon tend aujourd'hui à se démocratiser et son application au secteur de l'industrie est de plus en plus répandue. Le programme de recherche européen ARAMIS portant sur l'évaluation des risques dans le contexte de l'application de la directive Seveso II [14].

Le point central du nœud papillon est constitué par un événement redouté (ER), La partie en amont de l'ER est constituée par un arbre de défaillances (AdD) qui permet d'analyser les combinaisons de causes, et de valoriser les barrières de prévention mises en place pour prévenir l'apparition de l'ER.

La partie en aval est, quant à elle, constituée par un arbre d'événements (AdE) qui permet de différencier les conséquences en fonction du fonctionnement ou non des mesures de protection. Le synoptique, présenté (Figure 2-4), présente la structure d'un nœud papillon.

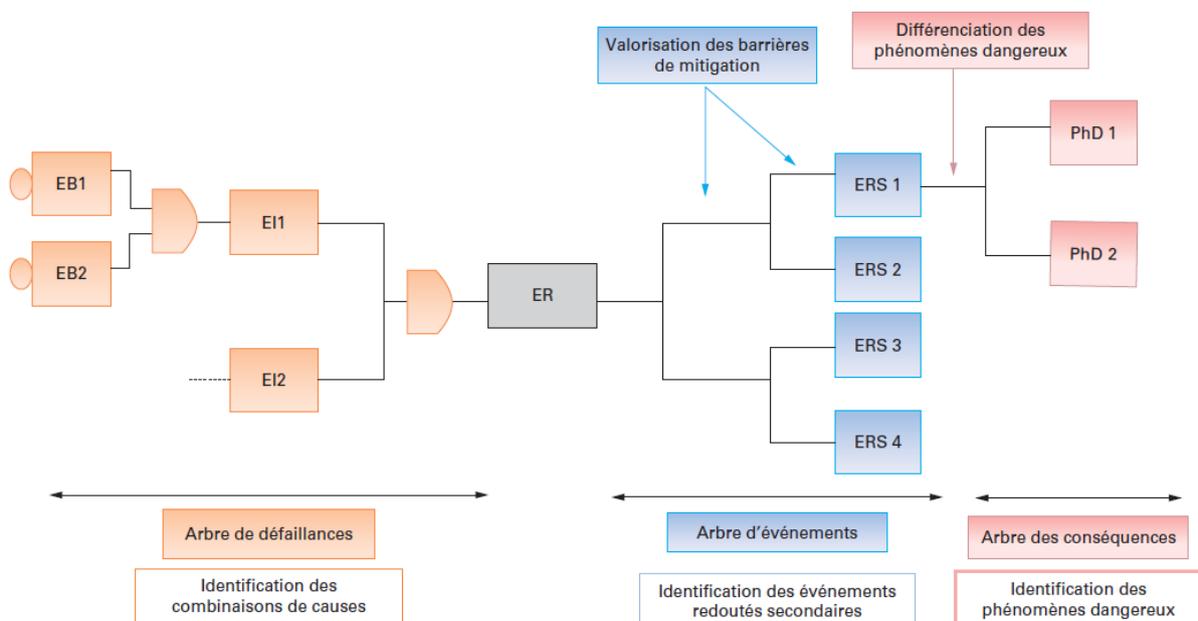


Figure 2-4 : Schéma d'un nœud papillon [14]

En fonction de la nature de l'ER, les événements de base peuvent être dits « indésirables ». Citons, par exemple, un choc mécanique sur une canalisation pouvant aboutir à l'ER : « brèche sur canalisation », ou bien la combinaison entre un événement courant et une défaillance, tel que le montage d'un bras de dépotage et l'absence de contrôle de bonne étanchéité pouvant aboutir à l'événement redouté « mauvaise étanchéité au niveau d'un bras de dépotage », en cas de montage défectueux [14].

Le principal intérêt du nœud papillon est qu'il permet de visualiser l'ensemble des chemins conduisant des événements de base jusqu'à l'apparition des phénomènes dangereux. Chaque chemin décrit un scénario d'accident. Un scénario d'accident est défini comme un enchaînement d'événements aboutissant à un événement redouté, conduisant lui-même à des conséquences lourdes ou effets majeurs.

En fonction de l'utilisation du nœud papillon, il est possible que ces nœuds soient plus ou moins complexes, La complexité d'un nœud papillon tient en effet :

- au niveau de développement de l'arbre de défaillances ;
- à la mise en évidence, explicite ou non, de la défaillance des barrières de prévention dans l'arbre de défaillances ;
- à la mise en évidence, explicite ou non, de la défaillance des barrières de protection dans l'arbre d'événements.
- l'analyse qualitative des risques qui vise à identifier les différents scénarios d'accidents ;
- l'analyse quantitative des risques qui vise à quantifier les probabilités des différents scénarios d'accidents [14].

2.5.1 Arbre de défaillances (AdD)

L'AdD consiste à déterminer à l'aide d'une arborescence descendante toutes les combinaisons de défaillances ou de causes amenant à la réalisation d'un événement redouté. Les événements sont reliés entre eux à l'aide de portes logiques qui permettent de traduire des liens de causalité. La construction d'un AdD est donc basée sur un raisonnement déductif [15], dont la formalisation est schématisée dans l'exemple de Figure 2-5.

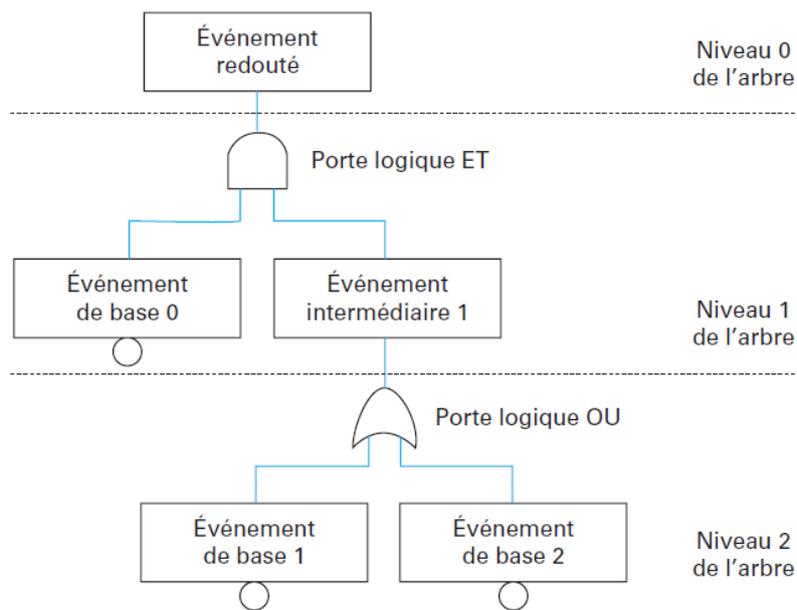


Figure 2-5 : Structure d'un arbre de défaillances [15]

L'objectif « qualitatif » est de construire une synthèse de tout ce qui peut conduire à un ER et d'évaluer l'effet d'une modification du système, de comparer les conséquences des mesures qui peuvent être envisagées pour réduire l'occurrence de l'ER étudié [15].

L'objectif « quantitatif » est d'évaluer la vraisemblance de la survenue de l'événement étudié à partir des combinaisons d'événements élémentaires qui peuvent le produire. Si on connaît les probabilités de ces événements on peut en déduire la probabilité de l'événement étudié et l'impact sur celle-ci d'une réduction (ou augmentation) de telle ou telle des probabilités élémentaires [15].

À défaut d'une quantification par probabilités, l'arbre permet d'apprécier le nombre de scénarios conduisant à l'événement étudié, le nombre minimum d'événements ou de conditions suffisant pour qu'il arrive, etc. [15]

2.5.2 Arbre d'événement (AdE)

Cette méthode a pour objectif, en partant d'un événement initiateur, de déterminer l'ensemble des séquences accidentelles susceptibles de se réaliser suivant que les barrières de protection remplissent, ou non, leurs fonctions de sécurité. Dans la méthodologie du nœud papillon, l'événement initiateur de l'arbre d'événements correspond à l'événement redouté, dont les combinaisons de causes sont explicitées par l'arbre de défaillances.

La Figure 2-6 présente un exemple d'arbre d'événement faisant intervenir trois barrières de sécurité. Cet arbre se parcourt de la gauche vers la droite en retenant la branche supérieure lorsque la barrière remplit sa fonction de sécurité (succès), et la branche inférieure dans le cas contraire (échec).

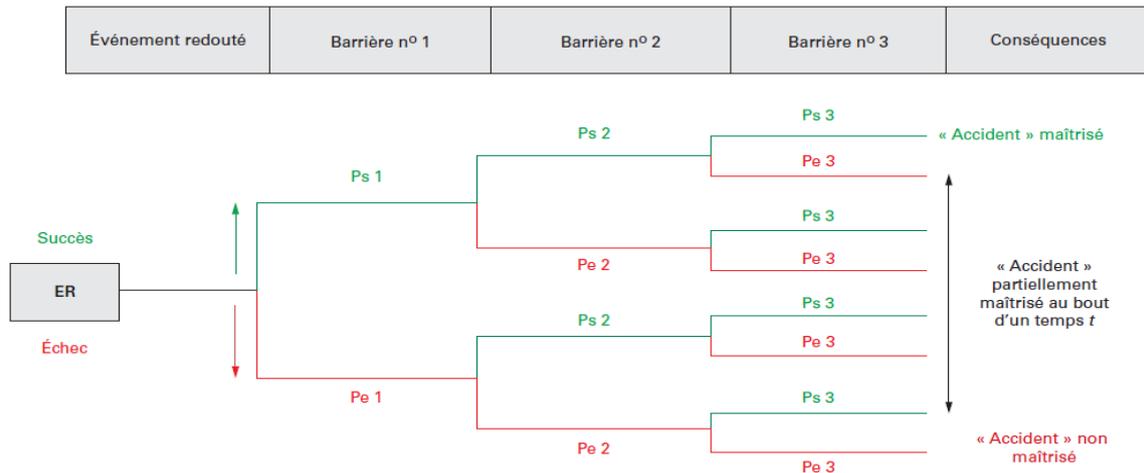


Figure 2-6 : Structure d'un arbre d'événement [15]

2.6 Analyse fonctionnelle

L'analyse fonctionnelle (AF) est indispensable pour réaliser une décomposition fonctionnelle et matérielle d'une installation industrielle en cours de conception ou en fonctionnement. L'utilisation de ces méthodes, par leurs caractères systématiques et exhaustifs, représente une garantie formelle pour décomposer une installation industrielle en niveaux fonctionnels et matériels nécessaires pour identifier les modes de défaillances et leurs conséquences sur les objectifs opérationnels retenus pour l'installation ou l'équipement concerné. De nombreuses méthodes d'analyse fonctionnelle ont été mises au point dans le monde depuis la fin de la Seconde Guerre mondiale et se déduisent des techniques d'analyse de la valeur, développée par L.D. Miles, en 1947, dédiées principalement aux produits nouveaux.

Selon L.D. Miles l'analyse de la valeur est une « *méthode de compétitivité, organisée et créative, visant la satisfaction du besoin de l'utilisateur par une démarche spécifique de conception à la fois fonctionnelle, économique et pluridisciplinaire* » [16].

Elle se caractérise par une démarche fonctionnelle qui impose de formuler le problème en termes de finalités et non en termes de solutions ; on évite la tendance à se limiter aux solutions existantes et à s'interdire inconsciemment de nombreuses possibilités.

L'AF consiste à recenser, caractériser, ordonner, hiérarchiser et valoriser les fonctions. Les méthodes d'analyse fonctionnelle permettent :

- de décrire le besoin d'un utilisateur en termes de fonctions, en faisant abstraction des solutions pouvant les réaliser. A chaque fonction sont attribués des critères d'appréciation et leurs niveaux. Les niveaux des critères d'appréciation sont les caractéristiques quantitatives de chaque fonction du produit. Pour chaque critère d'appréciation, on peut définir une flexibilité, c'est-à-dire un ensemble d'indications exprimées par le demandeur sur les possibilités de moduler un niveau recherché ;
- de décrire les choix technologiques que l'on impose au concepteur, en termes de contraintes. Les contraintes peuvent venir de l'environnement, de la technologie, du marché, de la situation et des choix de l'entreprise ou de l'organisme ;
- de s'assurer, pour chaque fonction, de sa bonne expression en termes d'objectifs et de sa stabilité dans le temps. C'est le but du contrôle de validité ;
- de décrire le produit envisagé comme solution, en termes de fonctions de service et en termes de fonctions techniques ou de conception ;
- d'initialiser l'optimisation du produit aussi bien du point de vue coût que du point de vue fiabilité [16].

2.6.1 Méthode SADT (Structure Analysis Design Technique)

La méthode SADT est une méthode d'AF et de conception des systèmes importants et complexes en facilitant la communication entre spécialistes de disciplines différentes.

Elle fournit des outils notamment pour :

- concevoir d'une façon structurée des systèmes vastes ou complexes ;
- communiquer des résultats de l'analyse et de la conception dans une notation claire et précise
- contrôler l'exactitude, la cohérence et, de façon générale, la qualité de manière continue et systématique par des procédures particulières de critiques et d'approbations.

La méthode introduit les concepts suivants :

- les fonctions qui échangent et transforment les données ;
- les données manipulées par les fonctions.

La méthode SADT met en œuvre deux représentations complémentaires :

- les actigrammes, dans lesquels les fonctions transforment les données d'entrées en données de sortie, suivant les contraintes imposées pour cette transformation et en utilisant certains moyens ou supports de l'activité ;
- les datagrammes, dans lesquels les données sont générées par des fonctions de génération, utilisées par des fonctions d'utilisation, sous la surveillance des activités de contrôle [16].

SADT définit une décomposition fonctionnelle hiérarchisée entre les différents niveaux de détail, la décomposition à un niveau donné doit faire apparaître des fonctions ou des données qui sont à leur tour décomposées. Pour la validation, on doit s'assurer que les entrées d'une fonction d'un niveau donné doivent se retrouver dans sa décomposition, et celle-ci ne doit produire que les sorties de la fonction de niveau supérieur [16].

L'accent est porté tout d'abord sur l'analyse et la spécification du « Quoi » (ce que le système doit faire) et ensuite sur les considérations sur le « Comment » (avec quels moyens on réalise le «Quoi »).

SADT utilise un seul type de boîte rectangulaire dont chacun des 4 côtés possède une signification particulière (Figure 2-7). Un diagramme SADT, pour chaque niveau hiérarchique, est constitué de 3 à 6 boîtes pour que la représentation soit suffisamment détaillée sans être trop complexe. La Figure 2-8 représente l'enchaînement des boîtes avec leurs relations entre les entrées, les sorties et les contrôles. Elle donne également un aperçu de la décomposition du bloc 1 à l'aide d'un diagramme de niveau hiérarchique inférieur.

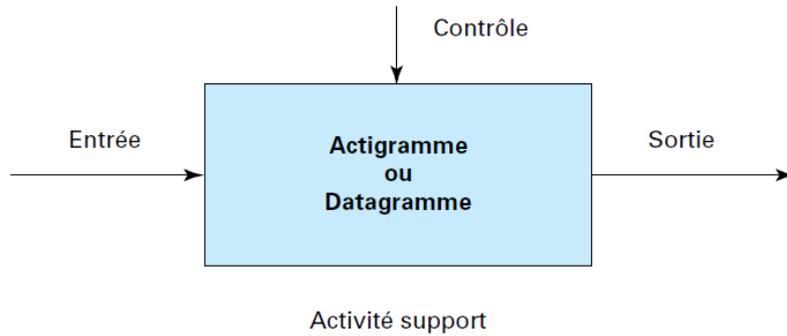


Figure 2-7 : Boîte utilisée par SADT [16]

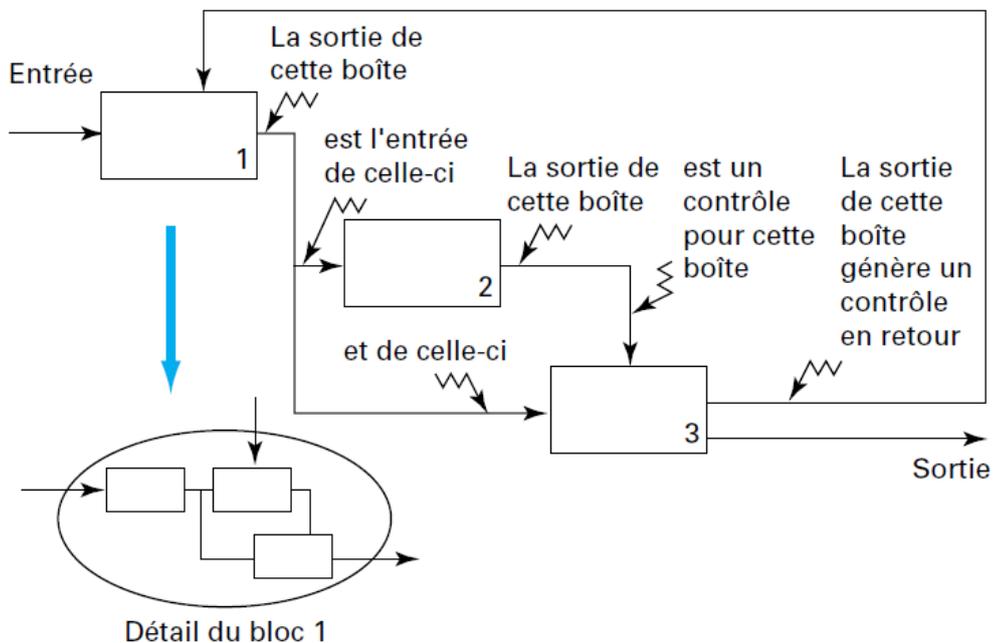


Figure 2-8 : Diagramme type SADT avec détail sur le niveau inférieur [16]

2.9 Analyse Pareto

Le diagramme de Pareto est un moyen simple pour classer les phénomènes par ordre d'importance. Vilfredo Pareto, démontra le principe d'une inégalité de la répartition des richesses et des revenus dans une population quelconque et en déduisit une loi qui peut s'énoncer ainsi :

« *Quand il y a un grand nombre de variantes possibles, très souvent moins de 20% de ces variantes représentent plus de 80% des cas qui peuvent se présenter dans la réalité* » [17].

Le diagramme de Pareto est un histogramme dont les plus grandes colonnes sont conventionnellement. Gauche et vont décroissant vers la droite. Une ligne de cumul indique l'importance relative des colonnes (figure 2-10).

Le diagramme de Pareto permet de mettre en évidence les éléments (effets et modes de défaillance) les plus importants d'un problème sur lesquels devront être concentrés en priorité les efforts d'amélioration (actions correctives et préventives). Cette analyse est également connue en gestion de production sous le nom de diagramme ABC ou loi des 80/20 qui postule que 80 % des effets sont imputables à seulement 20 % de causes.

L'analyse Pareto constitue la première étape dans la démarche permanente d'amélioration des produits et des procédés d'une entreprise. Il constitue notamment un indicateur sur l'état de l'avancement de la résolution du problème, car pour chaque action corrective la construction d'un nouveau diagramme de Pareto rend compte de l'amélioration de la qualité.

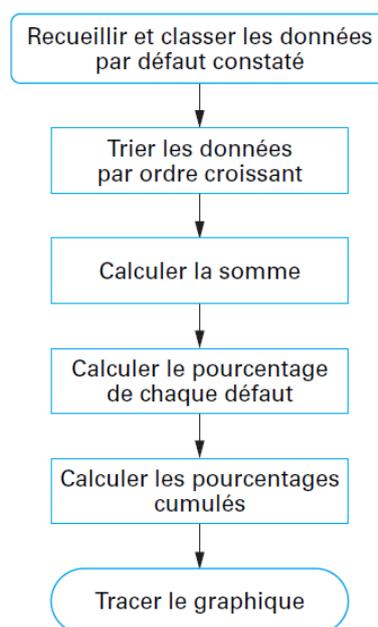


Figure 2-9 : Processus de construction d'un diagramme de Pareto [17]

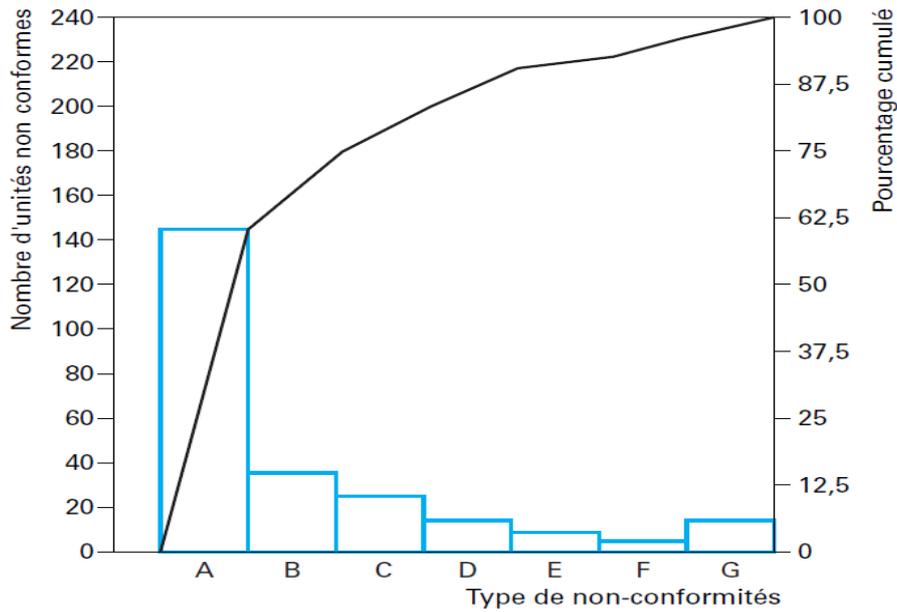


Figure 2-10 : Représentation du diagramme de Pareto [17]

Dans la première partie de ce chapitre nous avons mis en avant les concepts de base en matière de risque en général et de sûreté de fonctionnement en particulier, car la mise en place de moyens et de mesures pour atteindre un haut niveau de sécurité nécessite une maîtrise théorique et pratique de ces notions.

La deuxième partie quant à elle était dédiée à la définition de quelques méthodes pertinentes d'analyse d'une approche SdF, les domaines d'applications de ces dernières, ainsi que leurs processus de mise en œuvre, tout en mettant en évidence les avantages et les inconvénients qu'ils présentent, ceci afin de justifier les choix opérés dans la partie pratique dont on aura besoin dans la suite de notre travail.

Chapitre 3

APPLICATION DES

METHODES D'ANALYSE

APPLICATION DES METHODES D'ANALYSE

L'étape d'analyse des risques constitue le cœur de la démarche de maîtrise de risque sur laquelle nous allons nous baser pour définir les scénarios critiques qui doivent être maîtrisés, car connaître le risque auquel nous sommes confrontés permettra de s'en prémunir de son existence.

Dans ce chapitre nous allons utiliser les outils de la sûreté de fonctionnement dans toute sa globalité. Il sera donc exposé tout détail sur les résultats obtenus après l'application des méthodes d'analyse (SADT, Pareto, ADD, ADE, Nœud papillon) et ce, dans le but :

- De définir le système de production, de ses fonctions et de ses composants ;
- D'identifier les systèmes critiques ;
- D'identifier les risques critiques ;
- D'estimer les facteurs de risque ;
- De définir les scénarios plausibles.

3.1 Identification fonctionnelle du système de production du ciment

Durant cette étape, nous allons procéder à une analyse fonctionnel des systèmes présents dans la cimenterie afin d'aller en profondeur et en détail dans notre étude car cette étape permet de connaître tous les sous-systèmes qui entrent dans le fonctionnement de la cimenterie. Parmi les sous-systèmes constituant la cimenterie existe des sous-systèmes complexes qui nécessitent encore un découpage fonctionnel afin de mieux les comprendre aussi pour cerner les cibles de notre analyse des risques.

3.1.1 Analyse fonctionnelle par la méthode SADT

La méthode SADT est présentée comme méthode de spécification fonctionnelle des systèmes qui entre dans le cadre du domaine de la sûreté de fonctionnement. Elle sera appliquée dans notre cas dans le but de d'écrire le système de décomposer et de définir ses principales fonctions ainsi les interactions entre elles.

La description technique, figures (3-1,3-2,3-3), nous a permis de déduire les sous-systèmes suivants :

- Sous-système **A₀** : modèle SADT de la fabrication du ciment.
- Sous-système **A₁** : modèle SADT d'extraction et concassage.
- Sous-système **A₂** : modèle SADT du broyage à cru.
- Sous-système **A₃** : modèle SADT de la cuisson de la farine.
- Sous-système **A₄** : modèle SADT du refroidissement de clinker.
- Sous-système **A₅** : modèle SADT du broyage et stockage du ciment.
- Sous-système **A₆** : modèle SADT de la livraison.

Le formalisme A₀ : représente la boîte mère ou bien la boîte qui symbolise l'unité de la fabrication du ciment qui regroupe tous les paramètres qui participent à la réalisation de cette tâche.

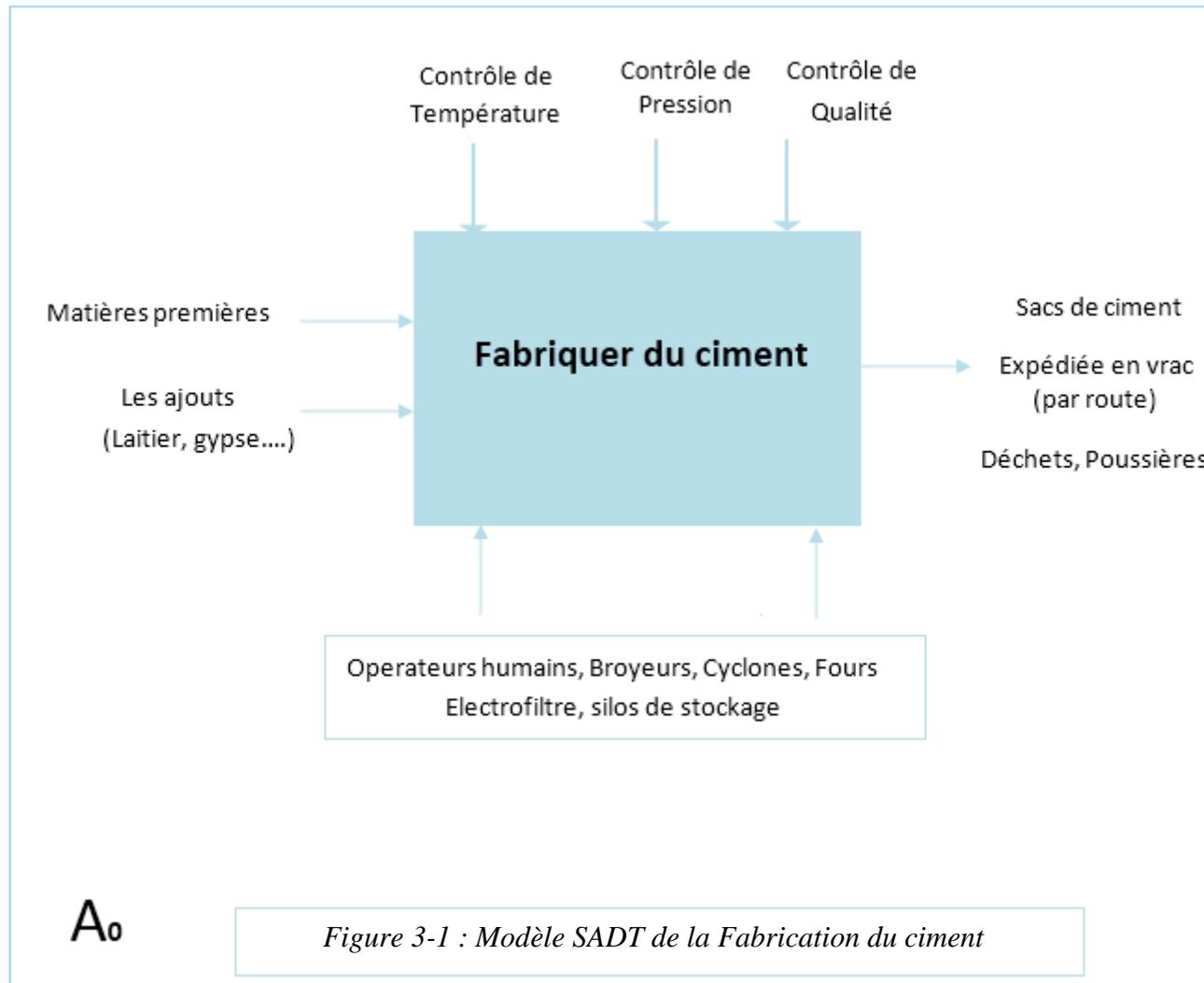
Nous avons décomposé cette boîte en six boîtes « **A₁, A₂, A₃, A₄, A₅, A₆** » qui constituent les six sous-systèmes important dans la fabrication du ciment.

Dans ce qui suit, nous allons traiter en détaille le sous-système **A₃** qui va faire l'objet d'une analyse SADT et un découpage fonctionnelle vue sa complexité, son importance dans la fabrication du ciment et le potentiel de danger qu'il représente.

Le formalisme A₃ (la cuisson de la farine) :

La boîte « **A₃** » est décomposée en quatre boîtes (**A₃₋₁, A₃₋₂, A₃₋₃, A₃₋₄**), nous pouvons aller plus loin dans la décomposition des fonctions mais on a opté pour ce niveau à cause de nombre de composants et les spécifications de l'installation :

- Boîte **A₃₋₁** : - Entrée de la farine avec une température ambiante.
 - Sortie de la matière sèche à 300°C et avec une ΔP égale à 66 mbar.
- Boîte **A₃₋₂** : - Entrée de la matière sèche à 300°C et avec une ΔP égale à 66 mbar.
 - Sortie de la matière déshydratée à 650°C et avec une ΔP égale à 44 mbar.
- Boîte **A₃₋₃** : - Entrée de la matière déshydratée à 650°C et avec une ΔP égale à 44 mbar.
 - Sortie de la matière décarbonisée à 900°C et avec une ΔP égale à 14 mbar.
- Boîte **A₃₋₄** : - Entrée de la matière décarbonisée à 900°C et avec une ΔP égale à 14 mbar
 - Sortie clinker à 1450°C et avec une ΔP égale à 1 mbar.



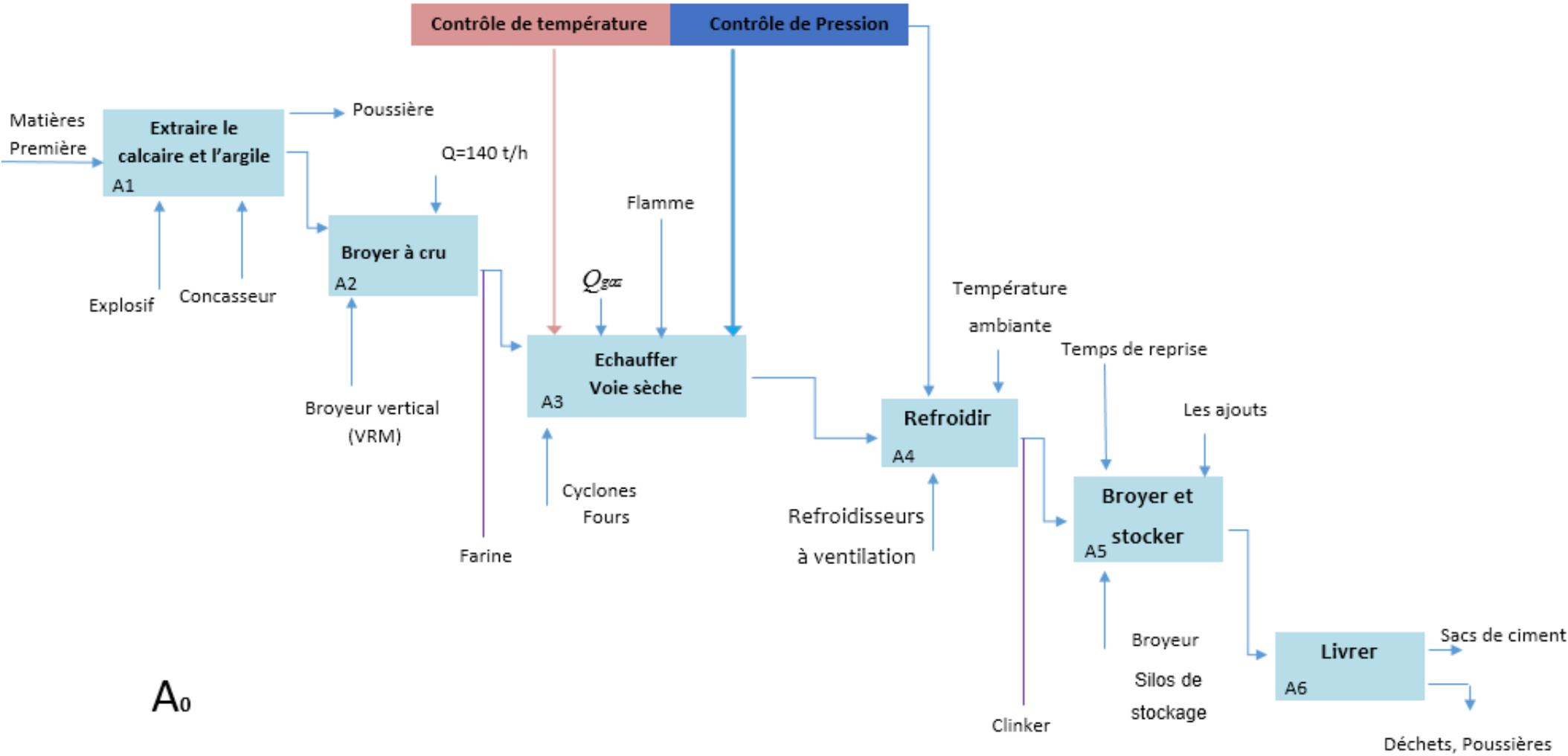


Figure 3-2 : Modèle SADT détaillé de la Fabrication du ciment

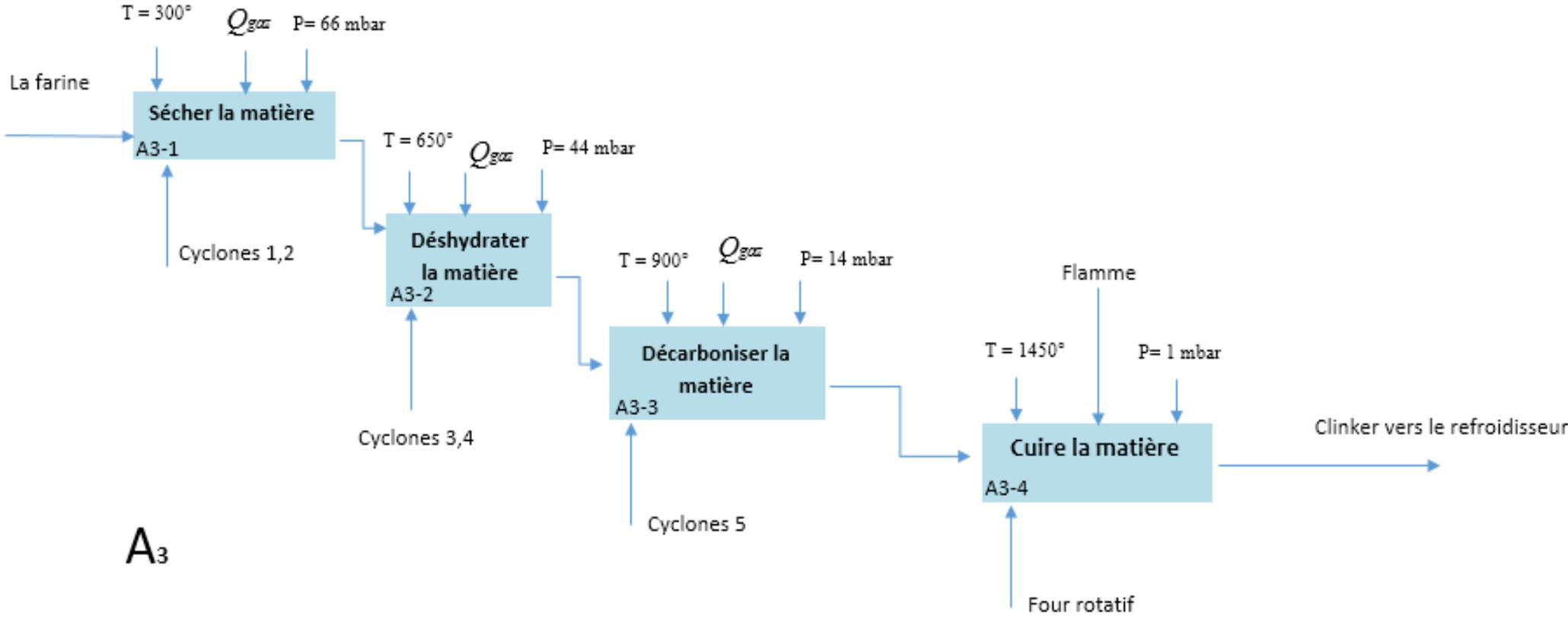


Figure 3-3 : Modèle SADT de la cuisson de la farine

Nous venons de définir clairement à travers une analyse fonctionnelle par la méthode SADT notre système et de délimiter les sous-systèmes qui nous intéressent dans notre étude.

Ce modèle élaboré dans cette phase d'analyse fonctionnelle sert de base pour l'élaboration de l'analyse des dysfonctionnements de notre système.

3.1.2 Décomposition fonctionnelle

Le découpage fonctionnel nous permet de ressortir avec non seulement un découpage précis en sous-systèmes composant les parties ciblées de l'installation, mais aussi d'identifier tous les éléments et les substances qui interagissent à l'intérieur. Cela nous permet d'acquérir forcément une connaissance approfondie de l'installation et de n'en négliger aucune partie.

Les deux systèmes identifiés dans notre cas sont :

- le broyeur vertical (figure 3-4) ;
- le four rotatif (figure 3-6) ;
- le ventilateur de tirage " ID FAN" (figure 3-13).

- **Broyeur vertical (VRM)**

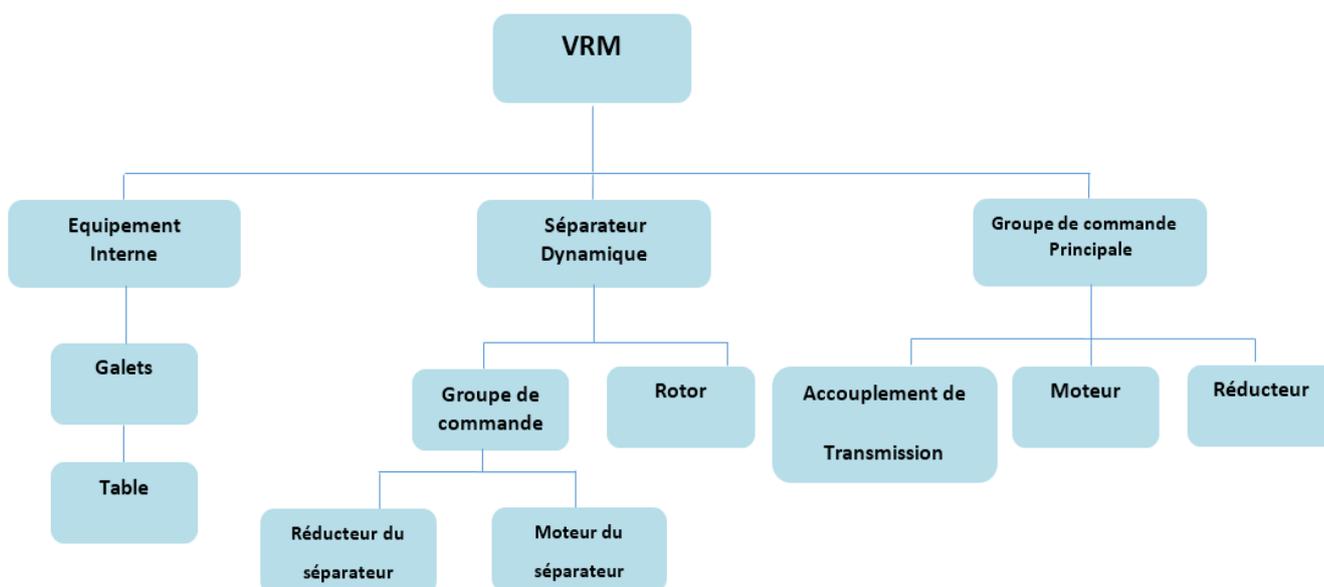


Figure 3-4 : Découpage fonctionnel de VRM

- **Galet** : sert à broyer la matière
- **Table** : sert à maintenir une couche de matière pour le broyage
- **Moteur du séparateur** : qui assure la rotation du séparateur.
- **Réducteur du séparateur** : sert à réduire le nombre de tour du moteur
- **Rotor** : sert à la transmission du mouvement de l'arbre séparateur.
- **Moteur Principale** : qui assure la rotation de la table
- **Réducteur de commande** : sert à réduire le nombre de tour du moteur
- **Accouplement de transmission** : assure le mouvement entre le réducteur et le moteur.

La figure 3-5 représente une schématisation de VRM :

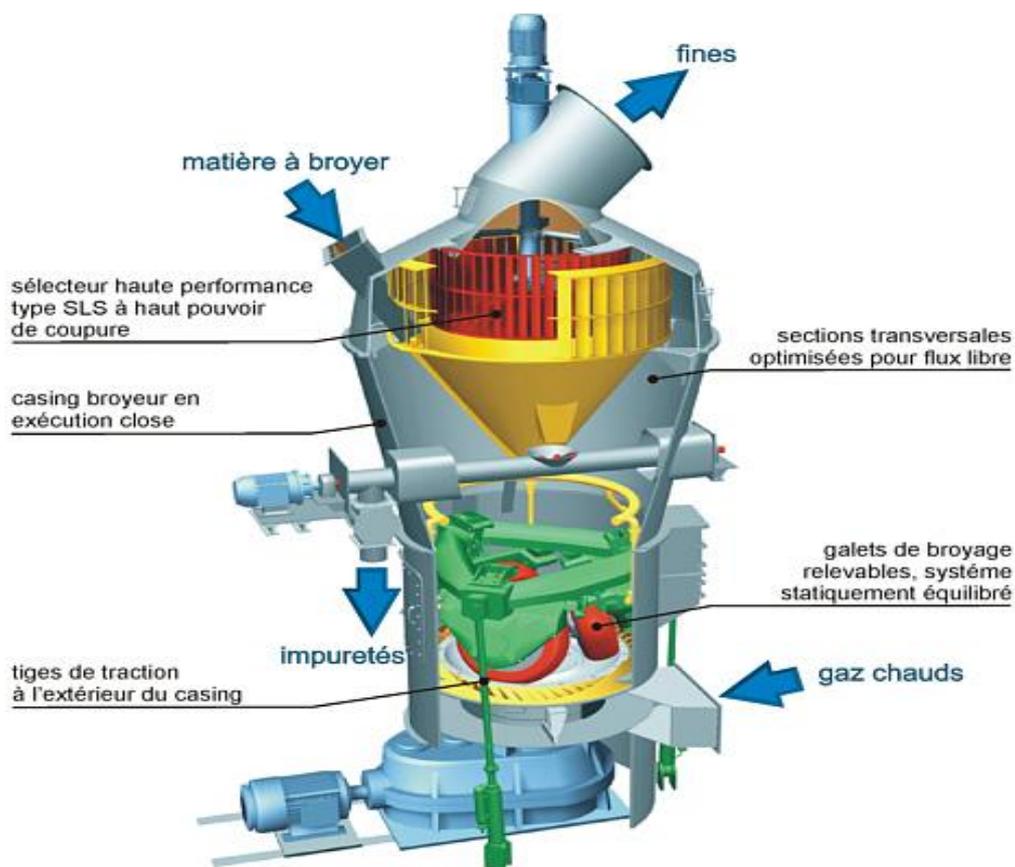


Figure 3-5 : Broyeur vertical (VRM) [LAFARGE]

- **Le four**

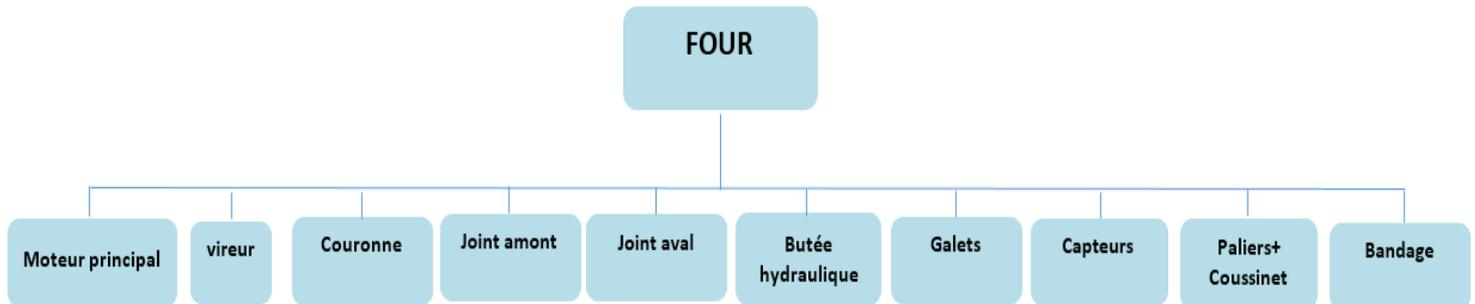


Figure 3-6 : Découpage fonctionnel du four

- **Moteur principal** : qui assure la rotation du four à une vitesse variable en marche normal (four alimenté)
- **Vireur** : qui assure la rotation du four à une petite vitesse constante (chauffage et refroidissement)
- **La Couronne** : pignon qui sert à la transmission du mouvement du moteur vers le four.
- **Joint amont** : un joint métallique qui assure la connexion entre la tour de préchauffage et la virole
- **Joint aval** : un joint métallique qui assure la connexion entre la virole et le refroidisseur
- **La butée hydraulique** : est un ensemble vérin hydraulique et butée, qui a pour but soit de garder la position axiale du four.
- **Les galets** : sont des formes cylindriques d'acier pleines, jouant le rôle de support du four.
- **Capteurs** :
 1. **Température** : indication de la température des paliers.
 2. **Position** : indication de la position axiale du four.
- **Palier+ coussinet** : support pour les axes de galet et assurer la lubrification par un film d'huile.
- **Le bandage** : un anneau métallique à section rectangulaire sert à l'appui de la virole.

La figure 3-7 représente une schématisation du four rotatif :

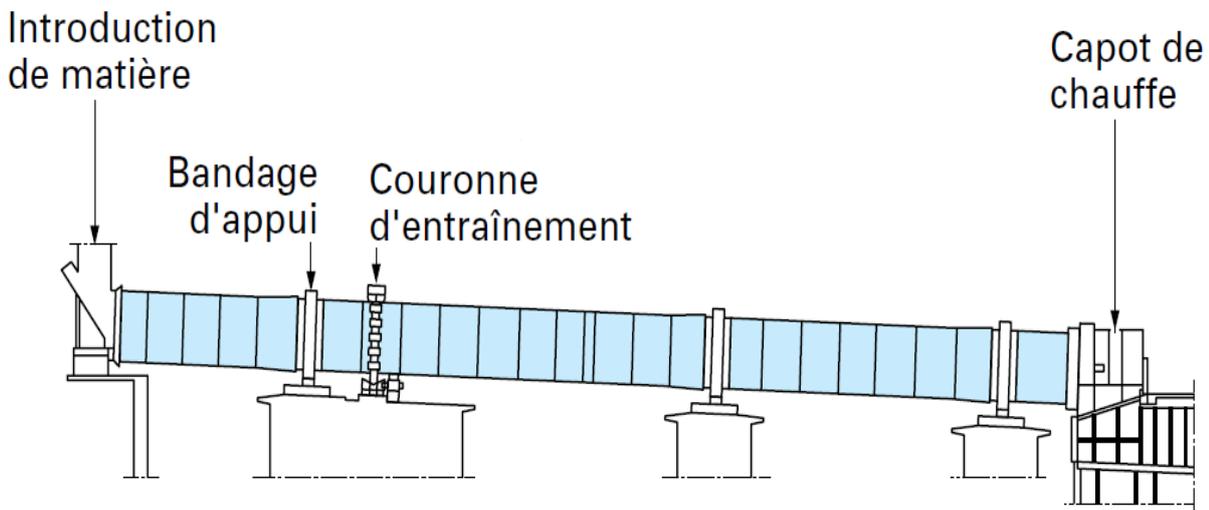


Figure 3-7 : Four à 3 appuis [7]

3.2 Identification des systèmes critiques

Dans cette étape nous allons exploiter l'historique des machines par le logiciel « *IBM Maximo Asset Management* » en concertation avec les responsables de la maintenance de l'entreprise pour faire une analyse des défaillances.

« *IBM Maximo* » fournit le calcul en temps réel de la configuration d'un actif et la durée de vie de chacun de ses composants. La solution permet d'exécuter avec précision une analyse et un reporting sur le système et les composants afin d'améliorer la fiabilité et de réduire les coûts de maintenance [18].

« *IBM Maximo* » permet d'assurer un suivi exact des vues actuelles et historisées des modifications transactionnelles apportées à la configuration des équipements et de leurs composants. Elle contribue également à accroître la fiabilité et la responsabilité facilitant la conformité dans les industries [18].

Cette analyse nous servira à déterminer les lieux des événements redoutés de notre système. Les lieux des événements redoutés sont évalués par un score, ainsi, on a affecté un coefficient de pondération à chacun de ces indices pour rendre compte de l'importance relative de l'un par rapport à l'autre. Cinq indices sont ainsi définis :

- **Indice de production (P)** : Coefficient qui représente l'effet de la défaillance de l'équipement sur la production.

Tableau 3-1 : Grille de niveau de production

Indice (P)	Critère P
1	Pas d'impact sur la production
2	Réduction de la production < 1/3
3	Réduction de la production < 2/3
4	Arrêt de production(Sec)

- **Indice maintenabilité (M)** : Coefficient qui représente les différents agents chargés de réparer l'équipement.

Tableau 3-2 : Grille de cotation maintenabilité

Indice (M)	Critère M
1	Agent de maintenance interne (LAFARGE-M'Sila)
2	Agent de maintenance interne (LAFARGE- Algérie)
3	Sous-traitance externe (National)
4	Sous-traitance externe (International)

- **Indice duré d'intervention (I)** : Coefficient qui représente la durée d'intervention pour remettre l'équipement en service.

Tableau 3-3 : Grille de cotation durée d'intervention

Indice (I)	Critère I
1	Inférieure à deux jours
2	Inférieure à quatre jours
3	Inférieure à six jours
4	supérieure à une semaine

- **Indice de détectabilité (D)** : Coefficient qui représente la probabilité que l'anomalie soit détectée par l'opérateur.

Tableau 3-4 : Grille de cotation détectabilité

Indice (D)	Critère D
1	Détection efficace qui permet une action préventive afin de prévenir la défaillance.
2	Il y a risque que la détection ne soit pas efficace
3	Le moyen de détection n'est pas fiable
4	Il n'y a aucun moyen de détection

- **Indice de fréquence (F)** : Coefficient qui représente la fréquence de répétition de la défaillance.

Tableau 3-5 : Grille de cotation de fréquence

L'indice (F)	Critère F
1	Chaque dix ans
2	Chaque cinq ans
3	Une fois par an
4	deux fois par an

Ces cinq indicateurs sont ensuite synthétisés par un indicateur appelé « Score » défini comme le produit des cinq critères précédents et a pour but de hiérarchiser les événements redoutés :

$$S = M \times P \times I \times D \times F \quad (3-1)$$

Le Score « S » qui signifie la criticité est calculé par une multiplication des niveaux des indices. Ces derniers sont estimés par les préparateurs et le chef de la maintenance mécanique, tout en se basant sur l'historique des machines et l'expérience de chacun pour estimer les durées des interventions, les tableaux sont représentés dans l'annexe A.

Nous utilisons l'analyse Pareto pour classifier et repartitionner les événements en trois zones. Cette hiérarchisation des événements, nous permettra de ne traiter que les plus prioritaires et les critiques des critiques dans le système.

3.2.1 Analyse de Pareto :

Le Score obtenu à l'aide des grilles établies, sera prise comme le critère de classification de la méthode ABC selon les trois zones.

Les tableaux (3-6,3-7) montrent les éléments avec leurs Score, pourcentages et leurs cumuls de pourcentages :

- **Broyeur vertical (VRM)**

Tableau 3-6 : Cumul du pourcentage de Score (VRM)

N°	Sous-système	Score	Pourcentage (%)	Cumul (%)
1	Equipements internes (Broyeur)	384	38.02	38.02
2	Elévateur (Transport du produit fini)	256	25.35	63.37
3	Groupe de commande(Broyeur)	192	19.01	82.38
4	Compresseur (Transport du produit fini)	48	4.75	87.13
5	Pompe IBAU (Transport du produit fini)	32	3.17	90.3
6	Ventilateur (Transport du produit fini)	24	2.38	92.68
7	Séparateur(Broyeur)	24	2.38	95.06
8	Centrale hydraulique(Broyeur)	16	1.58	96.64
9	Groupe de transmission(Gratteur)	8	0.79	97.43
10	la chaine(Gratteur)	8	0.79	98.22
11	Aéroglossière (Transport du produit fini)	6	0.59	98.81
12	Bande (transporteur)	4	0.40	99.21
13	Herses(Gratteur)	4	0.40	99.61
14	Moteur (transporteur)	2	0.20	99.81
15	Moteur(Gratteur)	1	0.10	99.91
16	Groupe de transmission (transporteur)	1	0.10	100
	Somme	1010		

- **Atelier cuisson (Four et Tour de préchauffage)**

Tableau 3-7 : Cumul du pourcentage de Score (Atelier cuisson)

N°	Sous-système	Score	Pourcentage (%)	Cumul (%)
1	Ventilateur ID FAN	432	33.13	33.13
2	Cyclones	432	33.13	66.26
3	Butée hydraulique	192	14.72	80.98
4	Briques	48	3.68	84.66
5	Vérole	48	3.68	88.34
6	Joint aval	36	2.76	91.10
7	Galet	32	2.45	93.56
8	Bandage	32	2.45	96.01
9	Joint amont	24	1.84	97.85
10	Plaques nose-ring	16	1.23	99.08
11	Pignon	4	0.31	99.39
12	Couronne	4	0.31	99.69
13	Réducteur	4	0.31	100.00
	Somme	1304		

Les figures (3-8,3-9) représentent les diagrammes Pareto associés au calcul de Score :

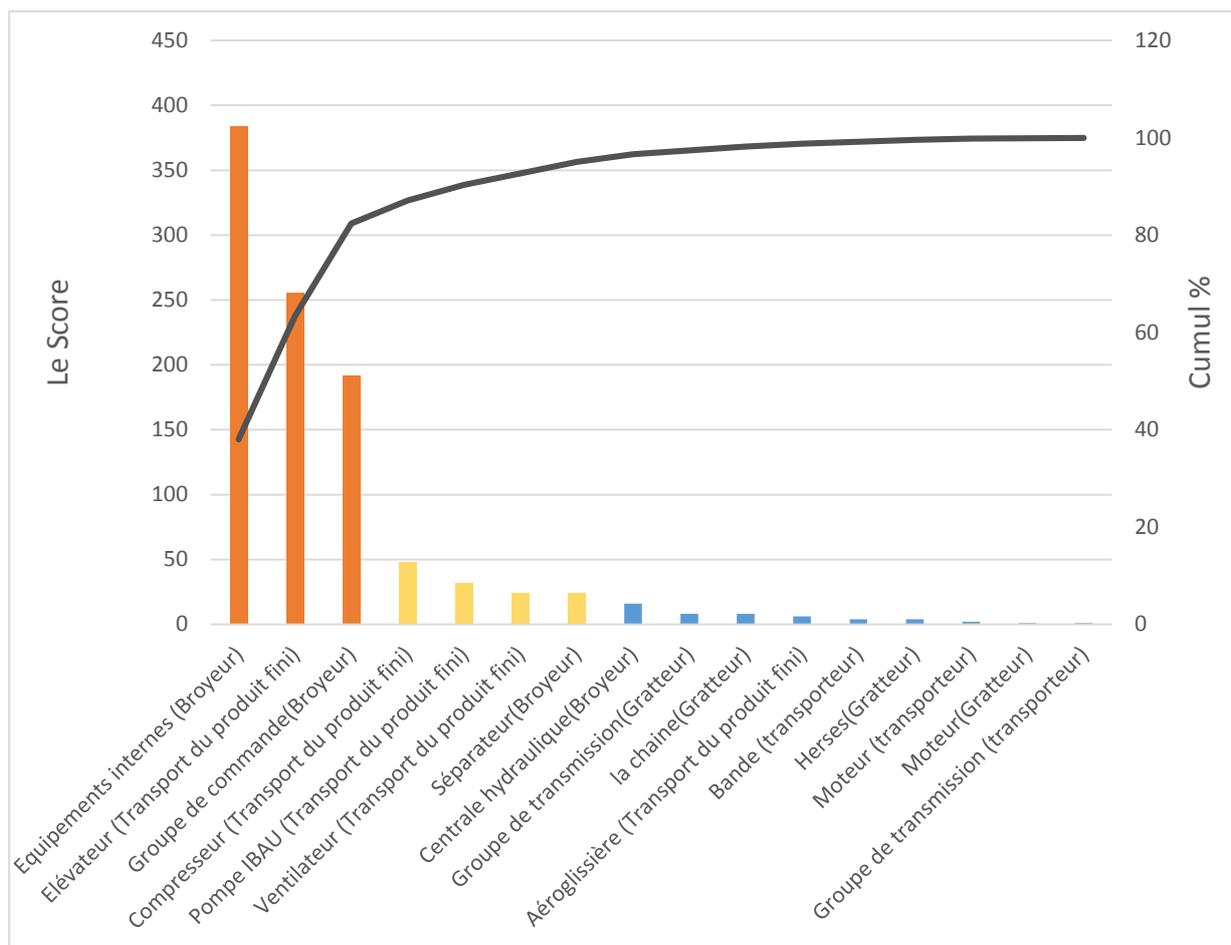


Figure 3-8 : Diagramme Pareto (VRM)

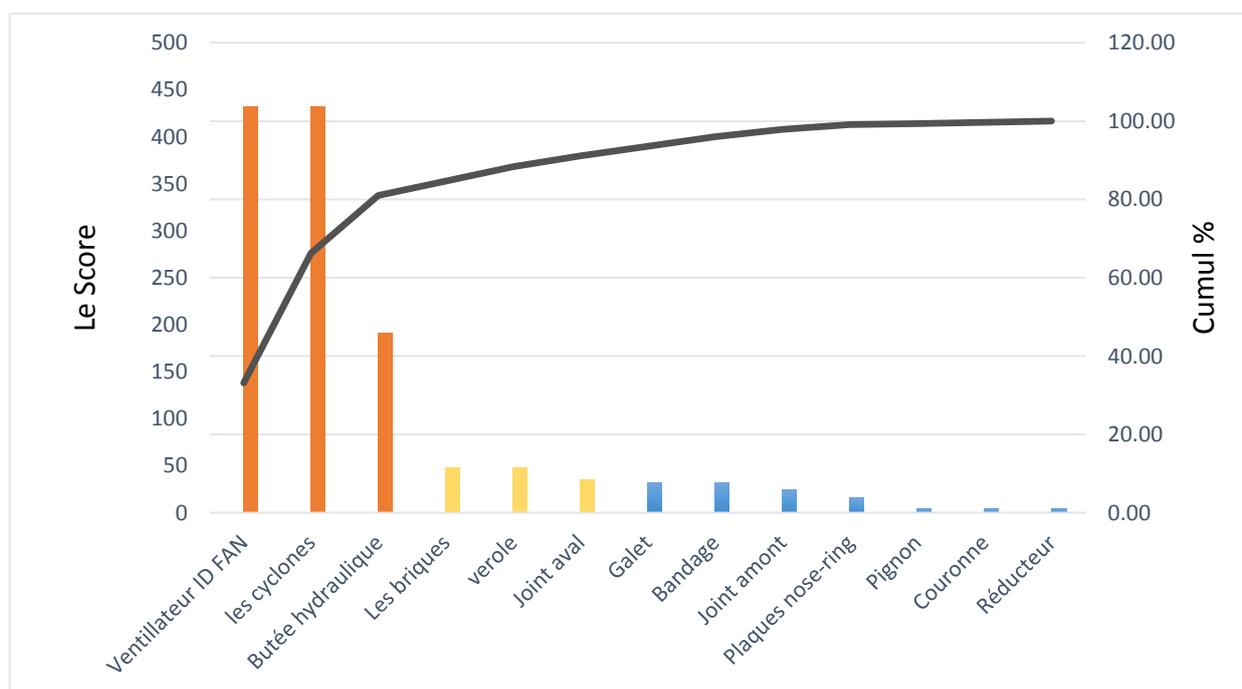


Figure 3-9 : Diagramme Pareto (Atelier cuisson)

A partir de l'analyse Pareto nous pouvons tirer les équipements qui sont aptes à être soumis à l'analyse :

1- Broyeur vertical (VRM)

- Réducteur de commande
- Elévateur farine
- Equipements internes

2- Atelier cuisson

- Ventilateur " ID FAN "
- Cyclones
- Butée hydraulique

A partir de l'analyse Pareto effectuée sur notre système, nous avons pu relever les problèmes principaux qui peuvent conduire aux événements redoutés. La contingence de ces événements redoutés sont hiérarchisés pour descendre jusqu'aux événements initiateurs, en cherchant les causes qui peuvent y conduire.

La méthode utilisée pour la structuration des événements est la méthode nœud papillon, qui va nous permettre de mettre en place des barrières de prévention, pour éviter l'arrivée de l'incident, et des barrières de protection pour éviter les effets et les conséquences engendrés. Ces barrières sont mises sous forme de procédure de contrôle, de suivi ou des changements des conditions d'exploitation tout en gardons le niveau de production plus ou moins constant.

L'étude porte essentiellement sur les équipements critiques tirés à partir de l'étude effectuée auparavant en vue d'instaurer un plan d'action. Nous allons le faire à l'aide de la méthode nœud papillon.

3.3 Identification et estimation des facteurs de risque

3.3.1 Broyeur vertical (VRM)

A. Arbre de défaillance (AdD)

Nous utilisons l'arbre de défaillance pour chaque ER retenu avec une plus grande criticité.

Les évènements redoutés auxquels nous élaborons un arbre de défaillance sont :

- Défaillance de réducteur de commande
- Défaillance de l'élévateur de farine
- Détérioration des équipements internes

Les combinaisons de causes qui pourraient être à l'origine de chaque évènement redouté sont schématisées dans les AdD représentées dans l'annexe B.

La probabilité de défaillance est calculée pour chaque évènement redouté centrale (ERC) à partir des probabilités de défaillance des évènements de base, dans le but de faire apparaitre les évènements les plus probables. Les probabilités des évènements de base sont de relevées après consultation des bases de données ([LAFARGE] et OREDA [19]).

Pour les calculs et la construction des arbres nous utilisons le logiciel « *GRIF-Workshop* » « *GRIF* » est une plate-forme logicielle d'analyse des systèmes développé au sein de « *Total* » qui permet de déterminer les indicateurs fondamentaux de la sûreté de fonctionnement. Cette plate-forme dispose ainsi de moteurs de calcul matures, très performants et aux capacités de modélisation propres à répondre aux besoins de l'ensemble des études fiabilistes.

Dans notre étude nous avons utilisé pour calculer la probabilité d'occurrence de la panne des composants deux modèles de fiabilité :

1- CMT (Temps de mission constant) :

La loi exponentielle a de nombreuses applications dans le domaine de l'ingénierie en particulier dans l'étude de fiabilité d'un équipement. Elle présente également diverses applications dans l'étude des phénomènes d'attentes (ex : La durée de vie utile d'un composant mécanique).

La définition de la loi est la suivante :

$$Q(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (3-2)$$

$Q(t)$: La probabilité d'occurrence de la panne

λ (**Lambda**) : Taux de défaillance

La loi CMT (Temps de mission constant) est un cas simplifié de la loi exponentielle avec un temps fixe donné en paramètre [19]. La définition de la loi est la suivante :

$$Q(t) = 1 - e^{-\lambda T} \quad (3-3)$$

T : temps de mission (dans notre cas est 8760 heures)

2- CST (Loi constante) :

Cette loi a seulement un paramètre : la probabilité d'occurrence de la panne **q**. Quel que soit le temps, la probabilité d'occurrence de la panne du composant est constante.

$$Q(t) = q \quad (3-4)$$

Cette loi correspond en général au cas où la seule défaillance considérée pour les composants est celle du refus de changer d'état (ex : vieillissement, usure...) [20].

1- Défaillance de réducteur de commande : Le tableau (3-8) donne la liste des événements de base, le modèle de fiabilité et les valeurs de taux de défaillance :

Tableau 3-8 : Données de l'AdD : Défaillance de réducteur de commande

N°	Code	Modèle de fiabilité	Taux de défaillance
1	Evt1	CST	1.0E-06
2	Evt2	CST	1.0E-02
3	Evt3	CMT	9.5E-02
4	Evt4	CMT	3.3E-01
5	Evt5	CMT	1.1E-02
6	Evt6	CST	4.8E-07
7	Evt7	CST	8.0E-08
8	Evt8	CMT	1.1E-02
9	Evt9	CST	1.0E-02
10	Evt10	CMT	4.0E-01
11	Evt11	CMT	1.5E-02
12	Evt12	CMT	2.9E-01
13	Evt13	CMT	3.3E-01
14	Evt14	CST	8.0E-08
15	Evt15	CST	5.4E-03
16	Evt16	CMT	7.2E-03

Nous avons utilisé le logiciel « GRIF » pour le calcul de la probabilité d'occurrence de notre ER à partir de tableau 3-8 :

Défaillance de réducteur de commande	2.04E-4
---	----------------

2- Détérioration des équipements internes : Le tableau (3-9) donne la liste des évènements de base, le modèle de fiabilité et les valeurs de taux de défaillance :

Tableau 3-9 : Données de l'AdD : Détérioration des équipements internes

N°	Code	Modèle de fiabilité	Taux de défaillance
1	Evt22	CST	1.14E-04
2	Evt20	CST	1.51E-06
3	Evt21	CMT	1.15E-02
4	Evt23	CST	4.56E-04
5	Evt19	CMT	1.15E-02
6	Evt18	CST	2.28E-04
7	Evt27	CST	1.51E-06
8	Evt24	CST	1.51E-06
9	Evt26	CMT	1.31E-02
10	Evt25	CMT	4.89E-03

Nous avons utilisé le logiciel « GRIF » pour le calcul de la probabilité d'occurrence de notre ER à partir de tableau 3-9 :

Détérioration des équipements internes	4.11E-2
---	----------------

3- Défaillance de l'élévateur de farine : L'élévateur est un dispositif de transport du produit fini (farine) vers le silo d'homogénéisation.

Le tableau (3-10) donne la liste des évènements de base, le modèle de fiabilité et les valeurs de taux de défaillance :

Tableau 3-10 : Données de l'AdD : Défaillance de l'élevateur de farine

N°	Code	Modèle de fiabilité	Taux de défaillance
1	Evt26	CST	1.51E-06
2	Evt27	CST	1.00E-02
3	Evt28	CST	4.40E-07
4	Evt29	CST	1.00E-02
5	Evt30	CMT	1.15E-02
6	Evt31	CMT	4.89E-03
7	Evt32	CMT	2.86E-01
8	Evt33	CMT	1.31E-02
9	Evt34	CMT	1.15E-02
10	Evt35	CMT	2.04E-04
11	Evt36	CST	4.80E-07
12	Evt37	CST	1.14E-04

Nous avons utilisé le logiciel « GRIF » pour le calcul de la probabilité d'occurrence de notre ER à partir de tableau 3-10 :

Défaillance de l'élevateur de farine	5.09E-02
---	-----------------

▪ **Interprétation des résultats (AdD)**

D'après le résultat obtenu en termes de probabilités d'occurrence pour chaque évènement non souhaité, nous concluons que l'évènement le plus probable est « Défaillance de l'élevateur de farine » puisqu'il correspond à la plus grande probabilité.

B. Arbre d'évènement (AdE)

Nous remarquons que les trois évènements redoutés centraux auxquels nous avons élaboré les AdD ont comme conséquence commune « l'arrêt de broyeur VRM », qui sera dans cette étape notre évènement central pour lequel nous allons développer l'AdE. Après le calcul de la probabilité d'apparition de notre nouveau ERC, l'AdE est la suivante :

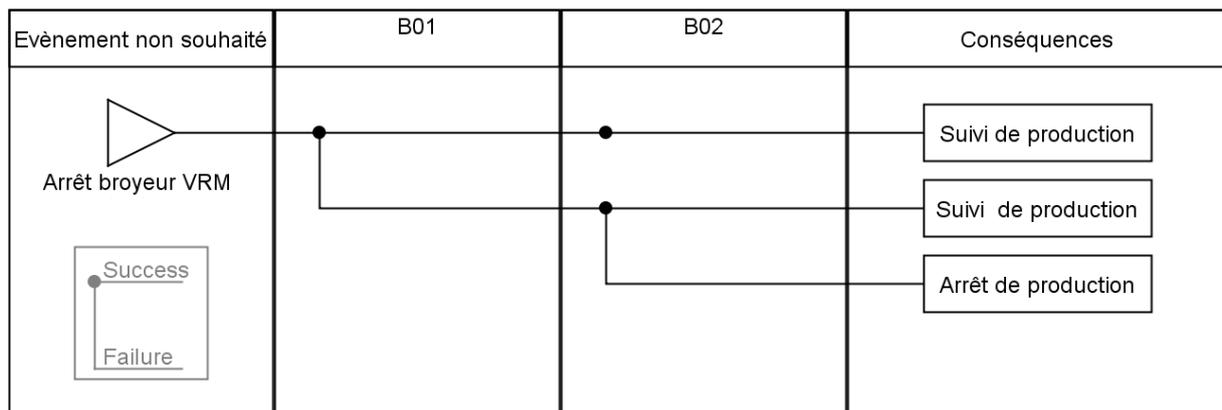


Figure 3-10 : AdE de l'arrêt broyeur VRM

Les probabilités de défaillance des procédures de sécurité ont été déterminées à partir de base de données [LAFARGE]. Leurs valeurs sont données dans les tableaux 3-11 :

Tableau 3-11 : Barrières de protection

Code	Barrières	Probabilités de défaillance
B01	-Changement du réducteur de commande du VRM 1 par celui du VRM 2. - Diminuer le débit du broyeur et isoler le galet défaillant de la fonction Broyage.	1.0×10^{-1}
B02	Approvisionnement clinker à partir des autres sites de LAFARGE	1.0×10^{-1}

- Probabilité d'occurrence de l'évènement redoutée « Arrêt de broyeur VRM »

$$P_{\text{Arrêt VRM}} = P_{\text{Elevateur}} + P_{\text{Equipements internes}} + P_{\text{Réducteur de commande}} = 9.22 \times 10^{-2}$$

- Calcul de la probabilité d'apparition de la conséquence « Arrêt de Production »

$$P_{\text{Arrêt production}} = P_{\text{Arrêt VRM}} \times P_{\text{B01}} \times P_{\text{B02}} = 9.22 \times 10^{-4}$$

- **Interprétation des résultats**

Après calcul des probabilités d'apparition des conséquences finales d'ER Arrêt de broyeur VRM retenu par la méthode AdE, nous constatons que la probabilité de l'arrêt de production est de 9.22×10^{-4} .

La conséquence d'arrêt de production sera l'objet d'une étude LOPA (analyse des couches de protection) afin d'améliorer la situation en termes de sécurité.

C. Nœud papillon

À l'aide de la méthode nœud papillon, nous schématisons le scénario relatif aux évènements non souhaités sur lesquels un arbre de défaillance et un arbre d'évènement sont établis. Cette dernière méthode nous a permis de comprendre clairement l'enchaînement possible pour avoir des conséquences non désirées (figure 3-11)

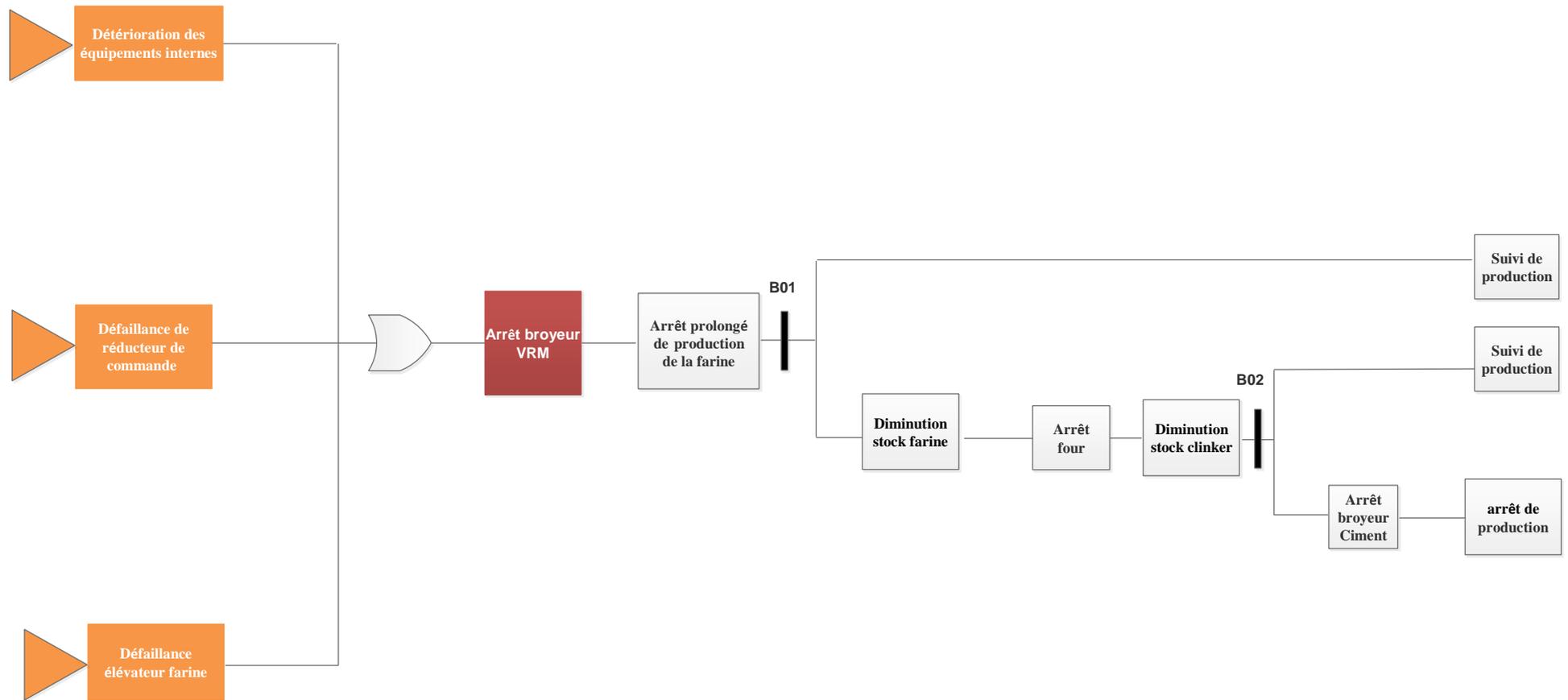


Figure 3-11 : Nœud papillon pour l'évènement « Arrêt broyeur VRM »

3.3.2 Atelier cuisson

A. Arbre de défaillance (AdD)

Nous utilisons l'arbre de défaillance pour chaque événement non souhaité retenu avec une plus grande criticité.

Les événements non souhaités auxquels nous élaborons un arbre de défaillance sont :

- Défaillance ventilateur " ID FAN "
- Bourrage du cyclone
- Défaillance de la Butée hydraulique

Les combinaisons de causes qui pourraient être à l'origine de chaque événement redouté sont schématisées dans les AdD représentées dans l'annexe B.

1- Défaillance Ventilateur " ID FAN " :

La circulation des gaz brûlés de fabrication provenant de four passant par la tour de préchauffage est assurée par le biais d'un ventilateur de tirage " ID FAN" situé en amont de la tour (figure 3-12). Ce ventilateur a un rôle primordial dans le procédé de fabrication du ciment car l'apparition d'une anomalie majeure au niveau de cet équipement pourrait causer l'avènement d'accidents.

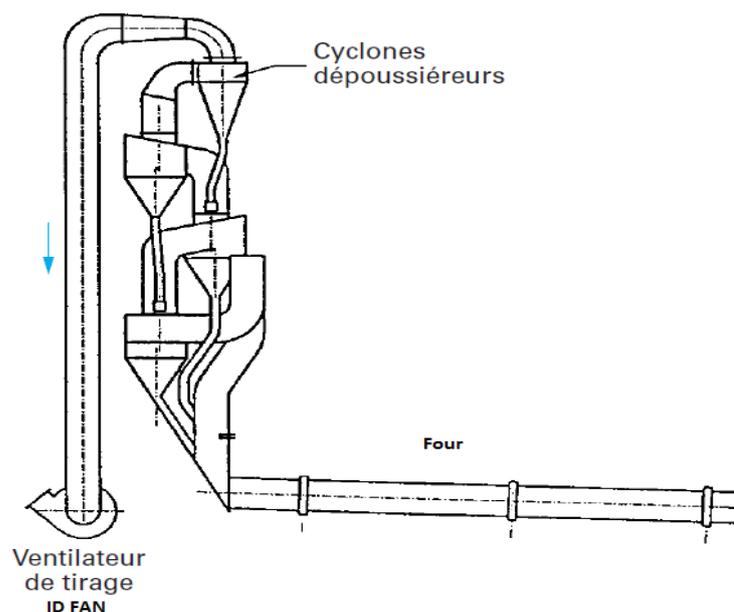


Figure 3-12 : Vue de l'extérieure de " l'ID Fan " [LAFARGE]

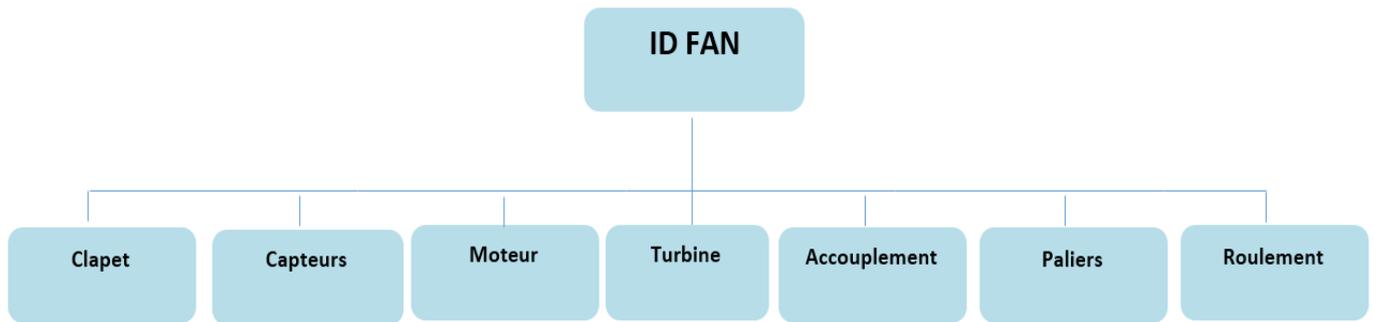


Figure 3-13 : Découpage fonctionnel de " l'ID Fan "

- **Clapet** : qui control le passage des gaz.
- **Capteurs** :
 - **Température** : indication de la température de l'axe et des gaz ventilés.
 - **Pression** : indication de pression d'eau de refroidissement.
 - **Vibration** : indication sur les vibrations de l'axe.
- **Le moteur** : électrique qui assure la rotation de la turbine grâce à son arbre excité par le stator et dont la vitesse de rotation est réglée par un variateur de vitesse.
- **La turbine** : qui assure le mouvement des gaz, grâce à sa forme et à la rotation de ses aubes. Il y a entrainement des gaz de l'entrée vers la sortie.
- **Un accouplement** : qui assure la jonction et la transmission de l'énergie rotative de l'arbre du moteur à l'axe de la turbine.
- **Palier** : support pour l'axe du ventilateur (deux extrémités de l'axe).
- **Roulement** : soulever l'arbre pour assurer sa rotation.

Le tableau (3-12) donne la liste des évènements de base, le modèle de fiabilité et les valeurs de taux de défaillance :

Tableau 3-12 : Données de l'AdD : Défaillance Ventilateur " l'ID Fan "

N°	Code	Modèle de fiabilité	Taux de défaillance
1	Evt1	CST	1.14E-04
2	Evt2	CMT	1.15E-02
3	Evt3	CMT	4.89E-03
4	Evt4	CST	1.00E-06
5	Evt5	CST	1.00E-02
6	Evt6	CST	1.14E-05
7	Evt7	CST	4.52E-05
8	Evt8	CMT	2.86E-01
9	Evt9	CMT	1.15E-02
10	Evt10	CST	8.00E-08
11	Evt11	CST	5.42E-03
12	Evt12	CMT	7.24E-03
13	Evt13	CST	1.14E-04

Nous avons utilisé le logiciel « *GRIF* » pour le calcul de la probabilité d'occurrence de notre ER à partir de tableau 3-12 :

Défaillance Ventilateur ID FAN	1.43E-01
---------------------------------------	-----------------

2-Bourrage du cyclone :

Le cyclone est l'équipement principal de la tour de préchauffage. Celle-ci comporte 5 cyclones qui sont disposés en étages avec une certaine architecture précisée, la fonction du cyclone est la séparation des gaz chauds de la poussière tout en permettant l'échange thermique entre les deux flux.

Le cyclone est composé, en partant du bas d'une goulotte de sortie, d'un cône, d'un cylindre qui contient des jupes dont la mission est de piéger la matière et puis d'un carneau de sortie des gaz. L'alimentation du cyclone se fait grâce au carneau d'entrée où se passe l'essentiel de l'échange thermique entre le gaz ascendant et la matière descendante (figure 3-14).

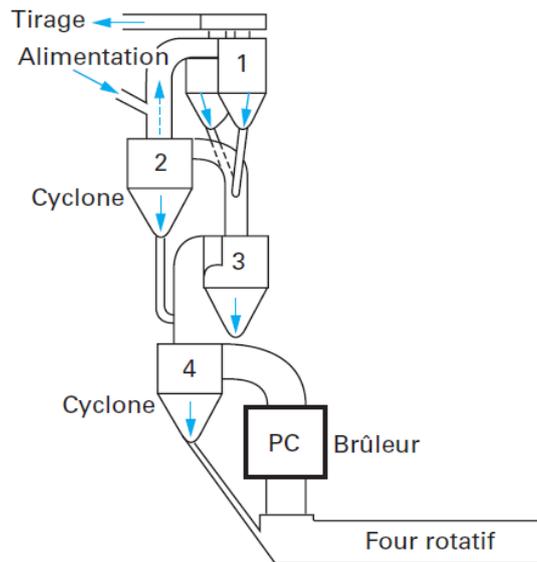


Figure 3-14 : schéma simplifié de la tour de préchauffage [7]

Le tableau (3-13) donne la liste des événements de base, le modèle de fiabilité et les valeurs de taux de défaillance :

Tableau 3-13 : Données de l'AdD : Bourrage du cyclone

N°	Code	Modèle de fiabilité	Taux de défaillance
1	Evt1	CST	1.51E-06
2	Evt2	CST	8.00E-08
3	Evt3	CMT	9.23E-02
4	Evt4	CST	1.00E-02
5	Evt5	CMT	5.76E-03
6	Evt6	CST	1.00E-02
7	Evt7	CST	1.14E-04
8	Evt8	CST	1.57E-02
9	Evt9	CST	2.00E-06
10	Evt10	CST	1.14E-04
11	Evt11	CST	1.57E-02
12	Evt12	CST	2.00E-06
13	Evt13	CST	1.51E-06

Nous avons utilisé le logiciel « GRIF » pour le calcul de la probabilité d'ER à partir de tableau 3-13 :

Bourrage du cyclone	3.21E-01
----------------------------	-----------------

3-Défaillance de la Butée hydraulique :

La butée hydraulique est un ensemble de vérin hydraulique et butée, qui a pour but de garder la position axiale du four, et de permettre la translation longitudinale du four.

La translation longitudinale du four est nécessaire pour assurer le bon fonctionnement et une bonne durée de vie des bandages et galets. Le bandage et le galet sont toujours en contact, la translation en continu du bandage par rapport au galet permet de répartir l'usure de surface et donc d'assurer un bon état de surface et un contact optimal du galet/bandage.

Le mouvement axial du four est périodique, il est composé : d'un mouvement de montée, assuré principalement par la butée qui est entraînée par le vérin hydraulique, lequel est relié à une centrale hydraulique, sa durée nominale est quatre heures, puis d'un mouvement de descente dont la durée est huit heures.

Le déclenchement de la pompe hydraulique permet l'accumulation de débit dans le vérin, ainsi la montée de pression dans la chambre du piston augmente la force de poussée qui est transmise par le galet de poussée au bandage du four. Le four commence à translater et le galet de poussée le suit grâce au guidage sur les deux tiges. Quand la fin de course est déclenchée, la pompe est à l'arrêt, le four commence son cycle de descente pour atteindre la fin de course de descente et relancer le cycle de nouveau.

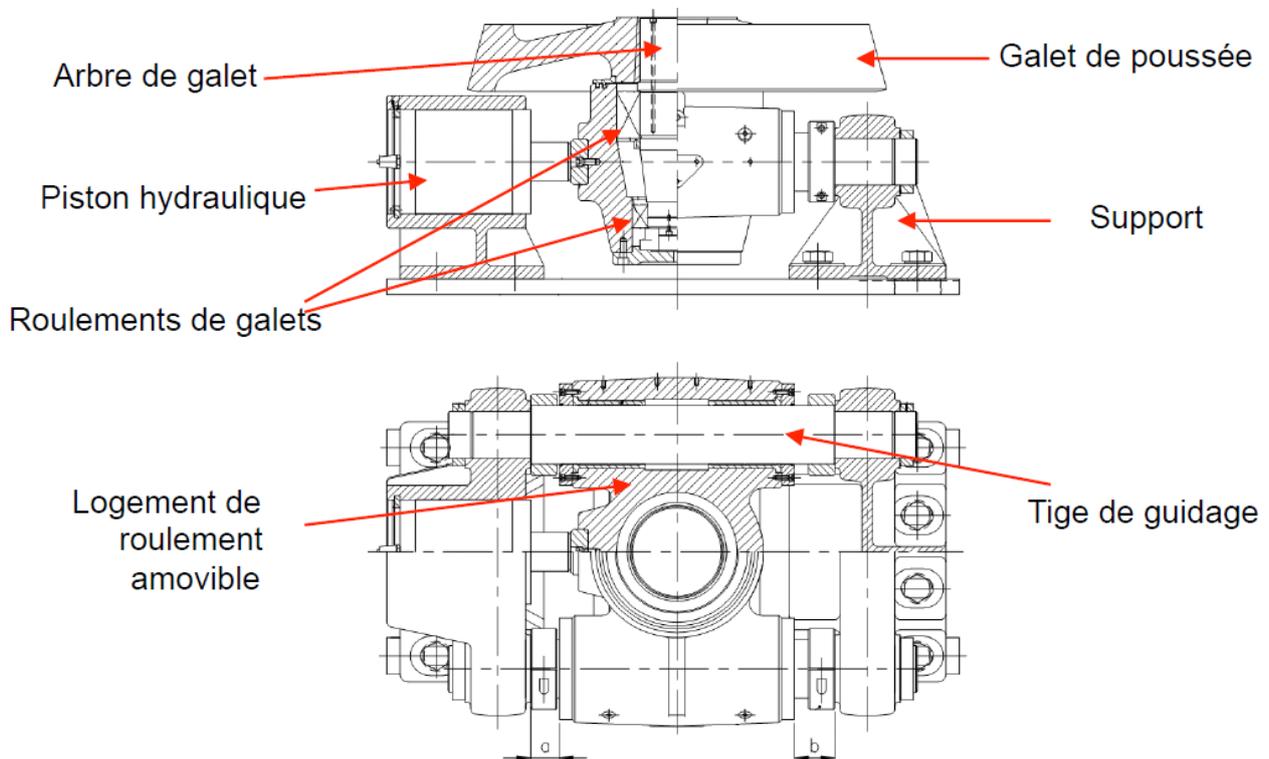


Figure 3-15 : Composantes de la butée hydraulique [LAFARGE]

Le tableau (3-14) donne la liste des évènements de base, le modèle de fiabilité et les valeurs de taux de défaillance :

Tableau 3-14 : Données de l'AdD : Défaillance de la Butée hydraulique

N°	Code	Modèle de fiabilité	Taux de défaillance
1	Evt1	CST	1.14E-04
2	Evt2	CMT	1.15E-02
3	Evt3	CMT	4.89E-03
4	Evt4	CST	4.52E-05
5	Evt5	CST	1.00E-02
6	Evt6	CST	1.00E-06
7	Evt7	CMT	7.24E-03
8	Evt8	CMT	5.76E-03

Nous avons utilisé le logiciel « GRIF » pour le calcul de la probabilité d'occurrence de notre ER à partir de tableau 3-14 :

Défaillance de la Butée hydraulique	3.89E-02
--	-----------------

▪ Interprétation des résultats (AdD)

D'après le résultat obtenu en termes de probabilités d'occurrence pour chaque évènement non souhaité, nous concluons que l'évènement le plus probable est « *bourrage de cyclone* » puisqu'il correspond à la plus grande probabilité.

B. Arbre d'évènement (AdE)

Un arbre d'évènement est élaboré pour les événements non souhaités les plus probables. Après le calcul des probabilités d'apparition des ER par l'AdD. La méthode AdE est appliquée aux événements suivants :

- Défaillance ventilateur " ID FAN "
- Bourrage du cyclone
- Défaillance de la Butée hydraulique

L'AdE permet de montrer la succession d'événements secondaires qui peuvent mener à un PhD. Cette méthode permet de calculer la probabilité d'apparition des conséquences finales. Les probabilités de défaillance des équipements et les procédures de sécurité ont été déterminées à partir des bases de données ([LAFARGE] et OREDA [10]). Leurs valeurs sont données dans les tableaux 3-15 :

Tableau 3-15 : Probabilités de défaillance des barrières de protection

Code	Barrières	Probabilités de défaillance
B01	Alarme	1.45×10^{-1}
B02	Arrêt du four	1.0×10^{-1}
B03	Soupape de sécurité	1.0×10^{-2}
B04	Air choc	6×10^{-8}
B05	Braquage des galets	1.0×10^{-1}

Les figures de 3-15 à 3-17 représentent l'AdE des ENS retenus :

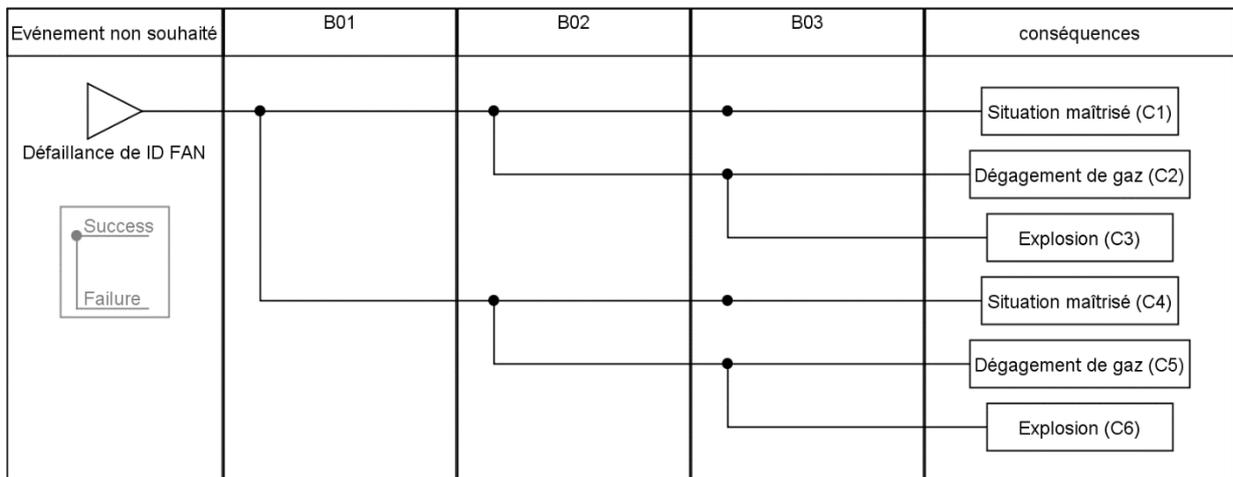


Figure 3-16 : AdE de défaillance de « ID FAN »

Le calcul de la probabilité d'apparition des phénomènes dangereux pour la « défaillance de ID FAN »

$$P(C3) = P_{\text{Déf ID FAN}} \times (1 - P_{B01}) \times P_{B02} \times P_{B03} = 1.22 \times 10^{-4}$$

$$P(C6) = P_{\text{Déf ID FAN}} \times P_{B01} \times P_{B02} \times P_{B03} = 2.0.7 \times 10^{-5}$$

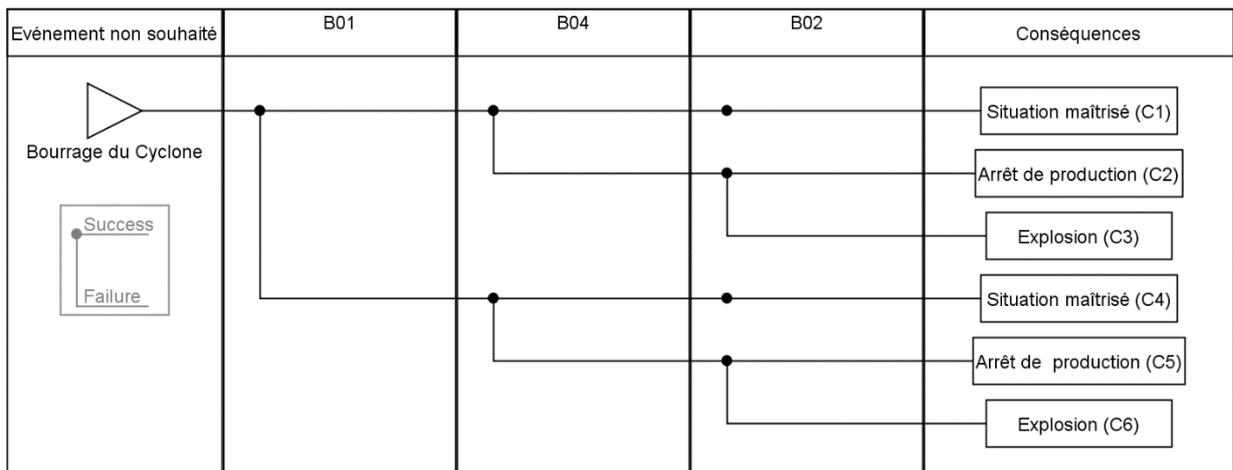


Figure 3-17 : AdE de bourrage du Cyclone

Le calcul de la probabilité d'apparition des phénomènes dangereux pour « Bourrage du Cyclone »

$$P(C3) = P_{\text{Bourrage du Cyclone}} \times (1 - P_{B01}) \times P_{B04} \times P_{B02} = 1.64 \times 10^{-9}$$

$$P(C6) = P_{\text{Bourrage du Cyclone}} \times P_{B01} \times P_{B04} \times P_{B02} = 2.79 \times 10^{-10}$$

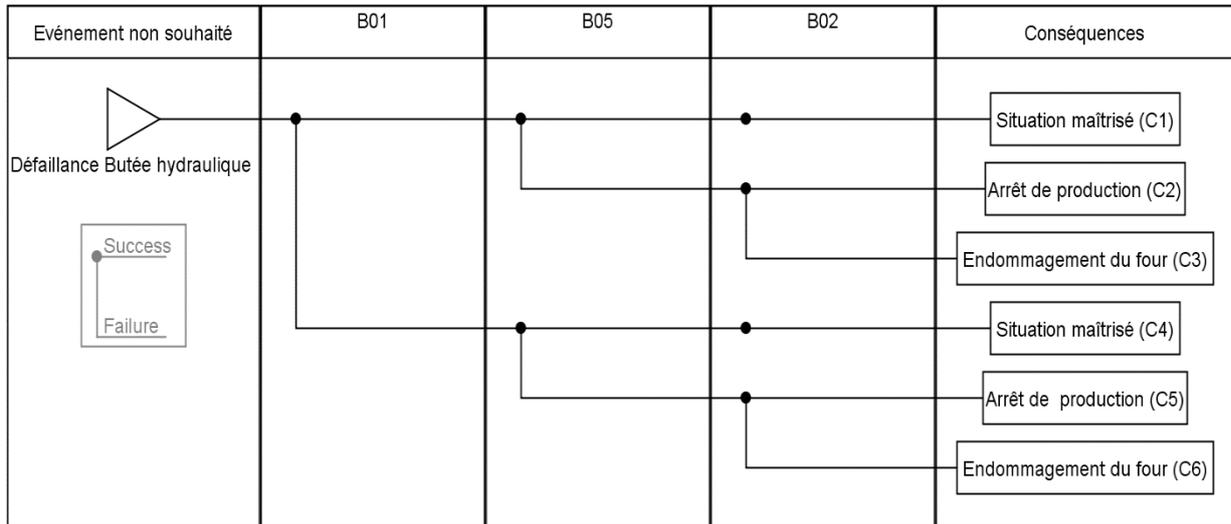


Figure 3-18 : AdE de défaillance de la butée hydraulique

Le calcul de la probabilité d'apparition des conséquences finales de « défaillance de la butée hydraulique » :

$$P(C3) = P_{\text{déf butée}} \times (1 - P_{B01}) \times P_{B05} \times P_{B02} = 3.32 \times 10^{-4}$$

$$P(C6) = P_{\text{déf butée}} \times P_{B01} \times P_{B05} \times P_{B02} = 5.64 \times 10^{-5}$$

▪ **Interprétation des résultats**

Après calcul des probabilités d'apparition des conséquences finales de chaque ER retenu par la méthode AdE, nous constatons que les deux événements les plus probables sont l'explosion due à une défaillance de " ID FAN " et l'endommagement des équipements du four.

La conséquence d'endommagement du four sera l'objet d'une étude LOPA (analyse des couches de protection) afin d'améliorer la situation en termes de sécurité ; l'explosion est un phénomène qui peut être simulé donc une modélisation de ses effets sera faites dans la suite de l'étude. Cependant, l'explosion dû au bourrage du cyclone ne sera pas traité dans la suite de notre étude vu sa faible probabilité.

C. Nœud papillon

À l'aide de la méthode nœud papillon, nous schématisons le scénario relatif aux évènements non souhaités sur lesquels un arbre de défaillance et un arbre d'évènement sont établis.

Cette dernière méthode nous a permis de comprendre clairement l'enchaînement possible pour avoir des conséquences non désirées et illustrer les différentes conséquences possibles avec les mesures de sécurité existantes, les principaux résultats obtenus dans cette partie sont :

- La schématisation des scénarios par la logique arborescente ;
- L'évènement non souhaité le plus probable : Bourrage du cyclone ;
- Le phénomène dangereux le plus probable : L'explosion dû à une défaillance de " ID FAN ".

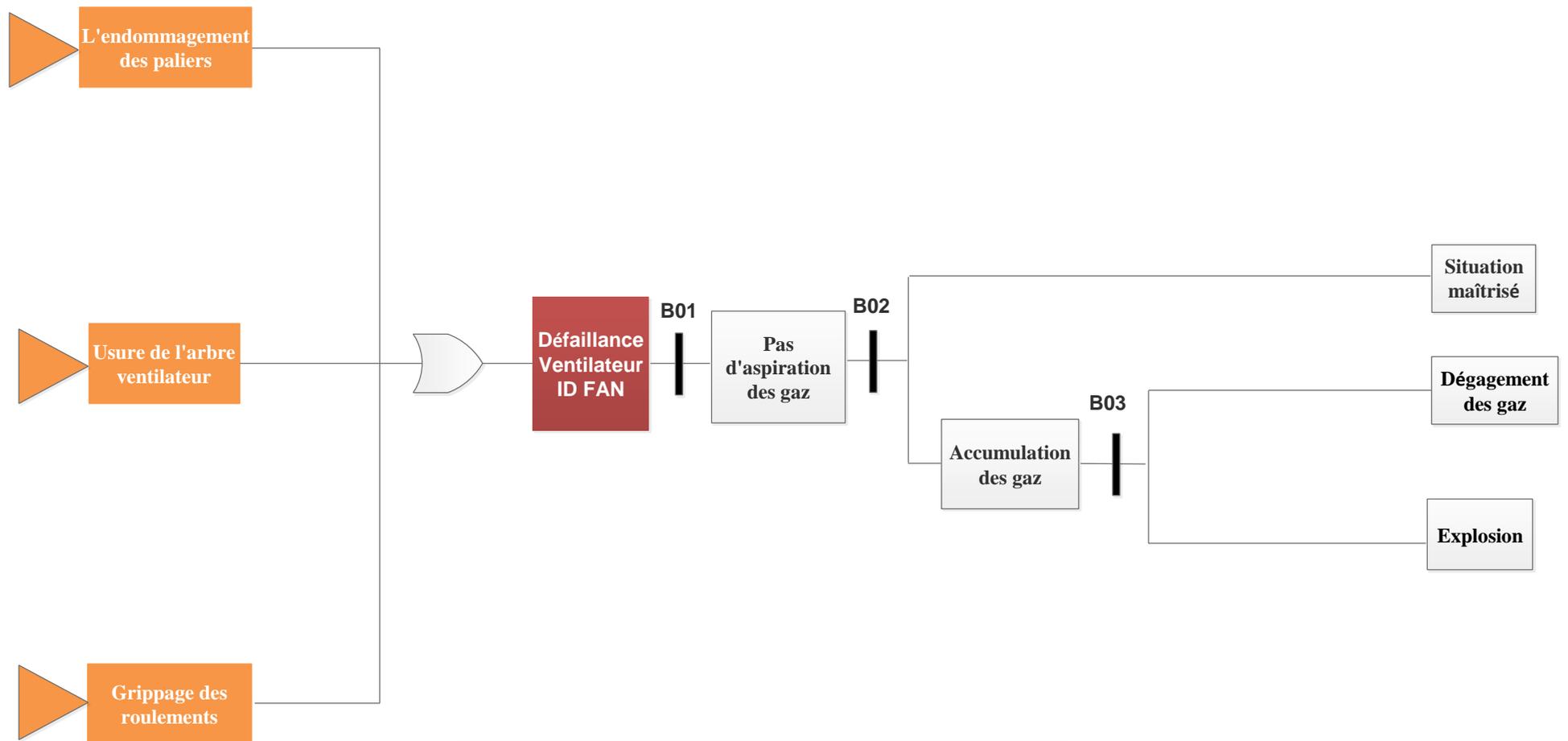


Figure 3-19 : Nœud papillon pour l'évènement « Défaillance de ID FAN »

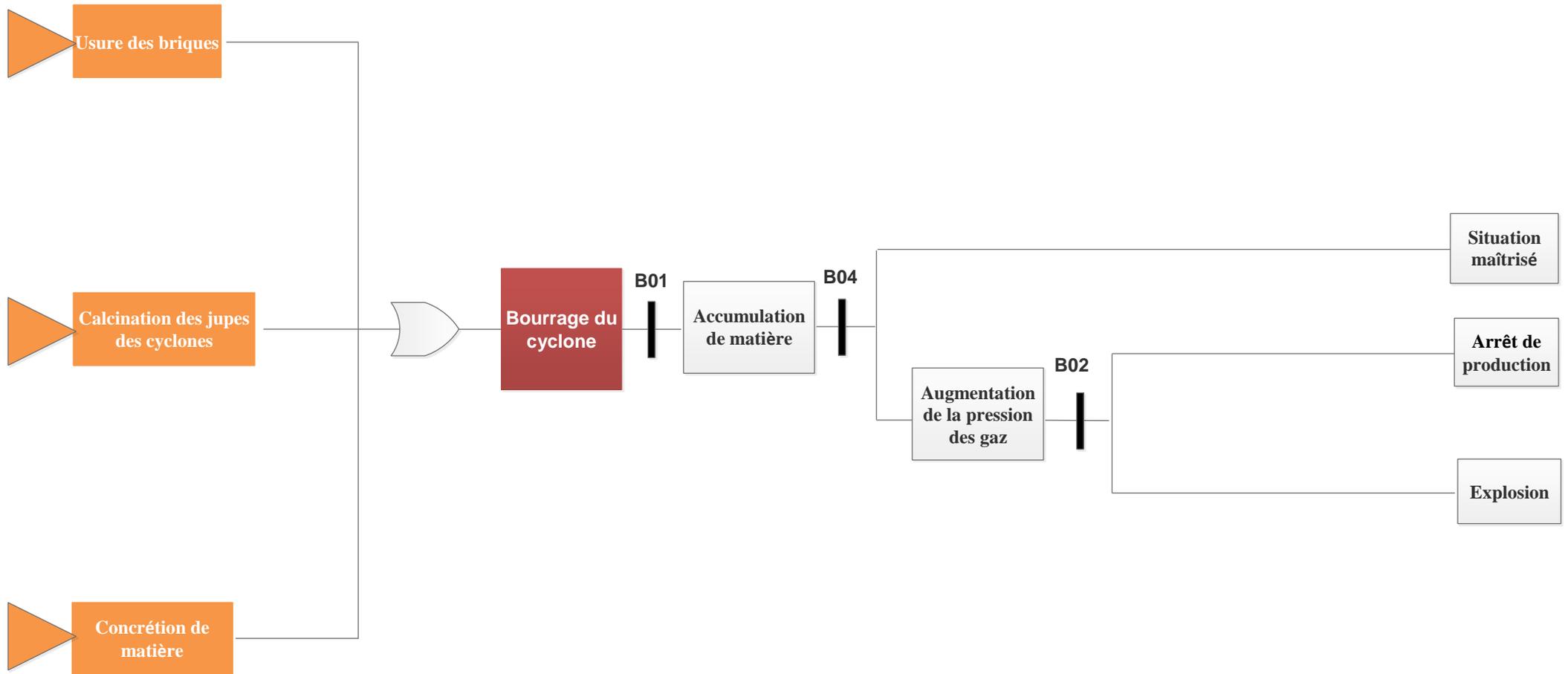


Figure 3-20 : Nœud papillon pour l'évènement « bourrage du Cyclone »

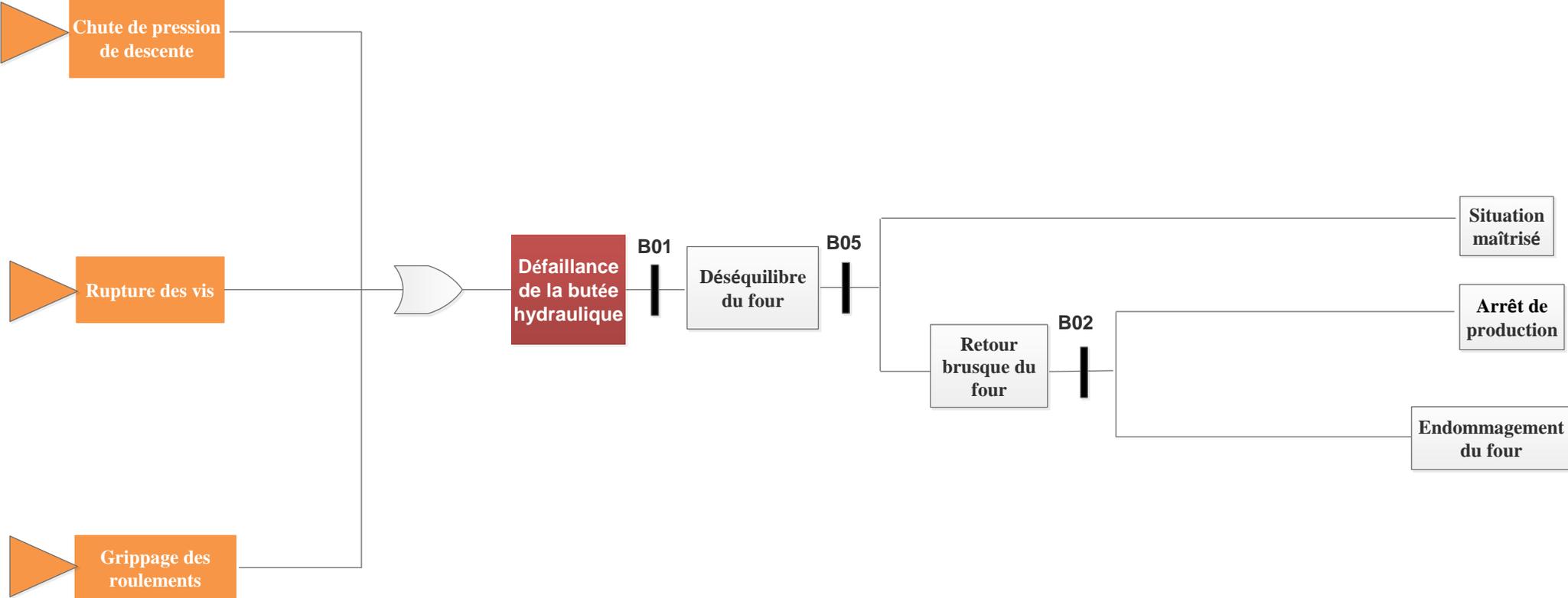


Figure 3-21 : Nœud papillon pour l'évènement « Défaillance de la butée hydraulique »

Ce chapitre nous a permis à partir de la première étape, d'identifier le système de production de ciment grâce à l'analyse fonctionnelle SADT, définir les sous-systèmes les plus critiques de la cimenterie, par l'analyse Pareto. Nous avons constaté dans la deuxième étape, lors de l'emploi de la méthode nœud papillon, Cette dernière nous a permis de comprendre clairement l'enchaînement possible pour avoir des conséquences non désirées, qui se traduisent par un arrêt de production en cas de bourrage de cyclone et arrêt de broyeur et une explosion en cas de " ID FAN ".

Le prochain chapitre sera consacré à l'étude de la gravité de ses conséquences, il sera dédié à la modélisation et à la simulation des effets.

Chapitre 4
MODÉLISATION DES
EFFETS

MODÉLISATION DES EFFETS

Les effets d'un phénomène dangereux se propagent sur le long de l'étendue en détruisant tout ce qui se trouve sur le chemin. Les conséquences de ces effets sont parfois destructives pour les structures, mortelles pour les personnes et graves pour l'économie de l'entreprise. Pour cela il est primordial de connaître les effets qui pourraient être émis par un phénomène dangereux généré par une installation afin de mettre en place des mesures adéquates pour s'en prévenir.

Dans le présent chapitre nous allons utiliser le logiciel PHAST pour modéliser les effets du PhD (explosion du four à cause d'une défaillance de " l'ID FAN ").

4.1 Description du phénomène « Explosion »

Plusieurs définitions sont établies pour le mot « Explosion », parmi lesquelles nous citons la définition donnée par le Groupement Français de Combustion : « *Une explosion est une libération soudaine d'énergie plus ou moins confinée, plus ou moins maîtrisée, avec ou sans conséquences externes, l'explosion peut donner lieu à une onde de pression, à une boule de feu. Dans le cas de l'explosion chimique, le processus de libération d'énergie peut être une déflagration ou une détonation* » [21].

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 données sur la figure 4-1 :

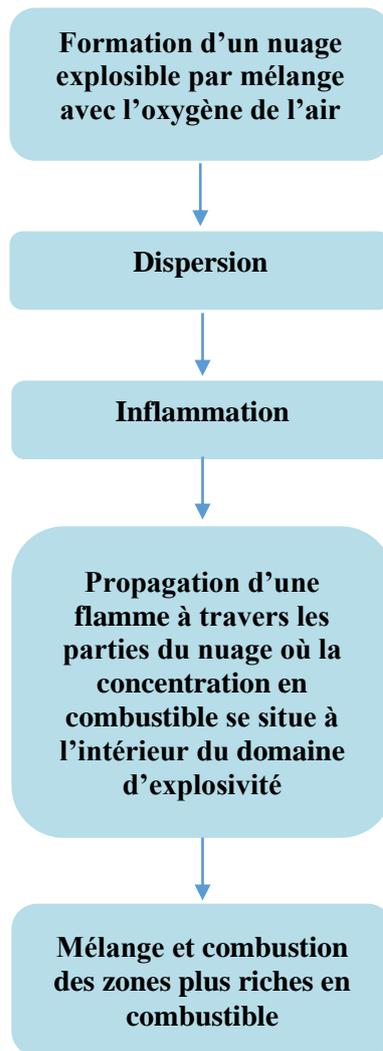


Figure 4-1 : Principales étapes dans le déroulement d'une explosion de gaz [22]

4.2 Régimes d'explosion

L'inflammation d'un prémélange gazeux entraîne la formation d'une zone de réaction exothermique, appelée onde de combustion ou plus simplement « flamme ». Dans cette zone, les réactifs sont transformés en produits brûlés et l'énergie chimique est transformée en chaleur. Selon la cinétique de cette transformation, deux régimes de propagation des flammes sont possibles :

- **La déflagration**, qui est généralement obtenue lorsque la source d'inflammation est de faible énergie ; dans ce cas, la vitesse de propagation des flammes est subsonique,
- **La détonation**, qui requiert pour son amorçage direct un apport d'énergie important, la vitesse de propagation des flammes étant dans ce cas supersonique, de l'ordre de 1000 à 2000 m/s.

4.3 Limites d'explosivité

4.3.1 Limite Inférieure d'Explosivité (LIE)

La limite Inférieure d'explosivité ou d'inflammabilité d'un gaz ou d'une vapeur dans l'air est la concentration maximale en volume dans le mélange au-dessus de laquelle il peut être enflammé (explosé).

4.3.2 Limite Supérieure d'Explosivité (LSE)

La limite supérieure d'explosivité ou d'inflammabilité d'un gaz ou d'une vapeur dans l'air est la concentration maximale en volume dans le mélange au-dessous de laquelle il peut être enflammé (explosé).

4.4 Description du Modèle TNT

Ce modèle d'origine militaire 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 en s'explosant engendrerait le même champ de surpressions que celui engendré par l'explosion d'un 1kg du mélange explosible considéré [21].

Cet équivalent TNT, noté par la suite M_{TNT} , est calculé au moyen de la relation (4-1) :

$$M_{TNT} = \alpha \times \frac{M_{gaz} \times \Delta H_{gaz}}{\Delta H_{TNT}} \quad (4-1)$$

Où :

α : Rendement de l'explosion de gaz

M_{gaz} : Masse du gaz inflammable qui participe à l'explosion en kg

ΔH_{TNT} : Pouvoir calorifique du TNT (4690 kJ/Kg)

ΔH_{gaz} : Le pouvoir calorifique de gaz.

Le rendement « α » 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 [21].

4.5 Sélection du phénomène dangereux : Explosion

Après le calcul des probabilités d'occurrences des événements non souhaités. Nous avons retenu comme événement le plus probable, l'explosion qui peut se produire au niveau du four suite à la défaillance de " l'ID FAN ". Cette situation critique pourrait donner lieu à une conséquence majeure telle que l'explosion dans notre cas. Ceci nous a amené à effectuer une simulation des effets de surpression afin d'estimer l'étendue de cette explosion sur un périmètre bien défini.

Nous pouvons décrire ce scénario comme suite :

- Un arrêt de " ID FAN " va provoquer une accumulation des gaz ce qui génère un manque d'oxygène dans le four (combustion incomplète) qui va générer le monoxyde de carbone. L'augmentation de la pression dans le four va propulser les gaz à travers la tour de préchauffage et par la suite le monoxyde de carbone va continuer sa circulation vers l'électro-filtre le point de contact avec l'air où il aura l'explosion (figure 4-2).

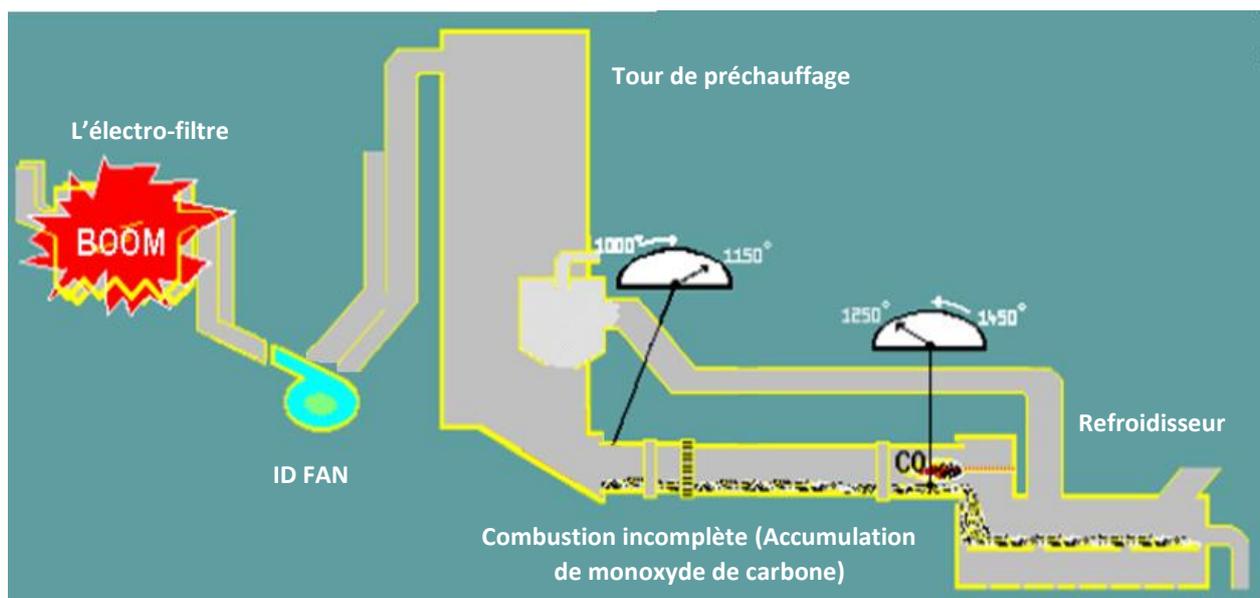


Figure 4-2 : Schéma descriptif de l'explosion

4.6 Application sur le logiciel PHAST

Nous avons collecté les données utiles concernant l'application du modèle TNT sur le logiciel PHAST. Ces données sont rassemblées dans le tableau 4-1 :

Tableau 4-1 : Paramètres d'entrés pour le logiciel PHAST

Données sur le combustible	
Combustible	monoxyde de carbone (CO)
Quantité du combustible	1560.27 Kg
Donnée sur la carte de localisation	
Distance maximale	500 m
Distance minimale	10 m
Le pas	10 m
Le rendement	10 %

La figure 4-3 représente la variation de la surpression en fonction de la distance :

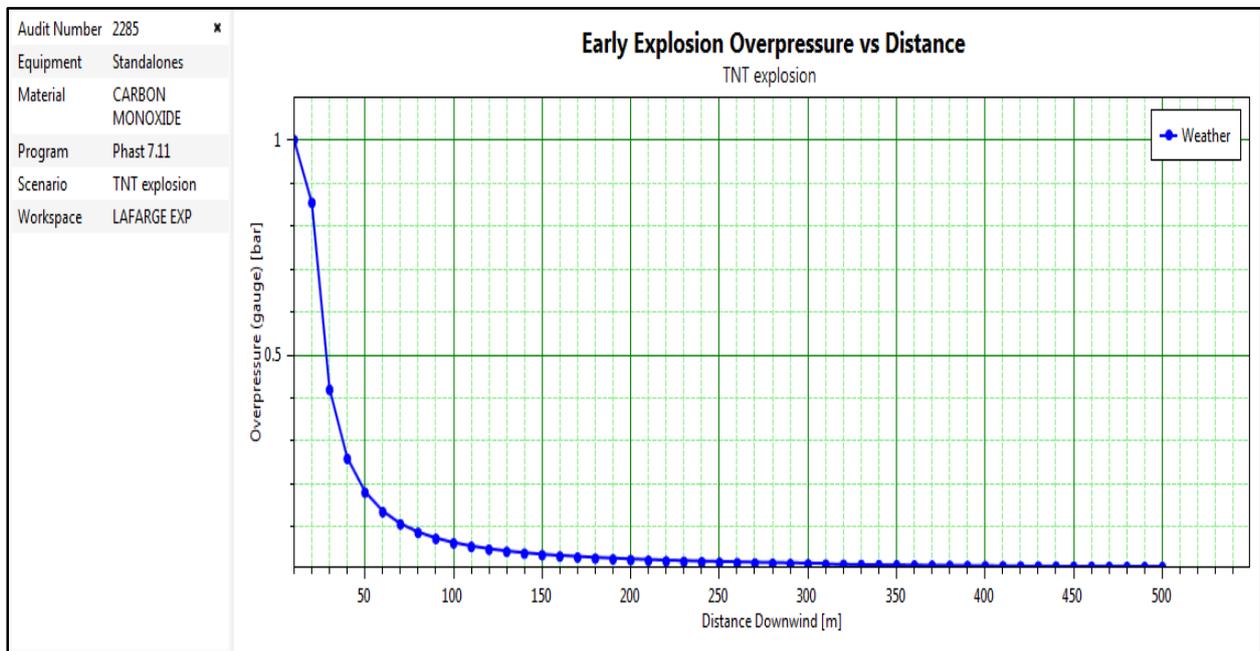


Figure 4-3 : Variation de la surpression en fonction de la distance

Les seuils critiques de surpressions données par le logiciel PHAST sont dans le tableau 4-2 :

Tableau 4-2 : Seuil de surpression

Surpression (bar)	Distance (m)
0.02	240 m
0.14	60 m
0.21	40 m

Les distances des seuils critiques de surpression sont données par la figure 4-4 :

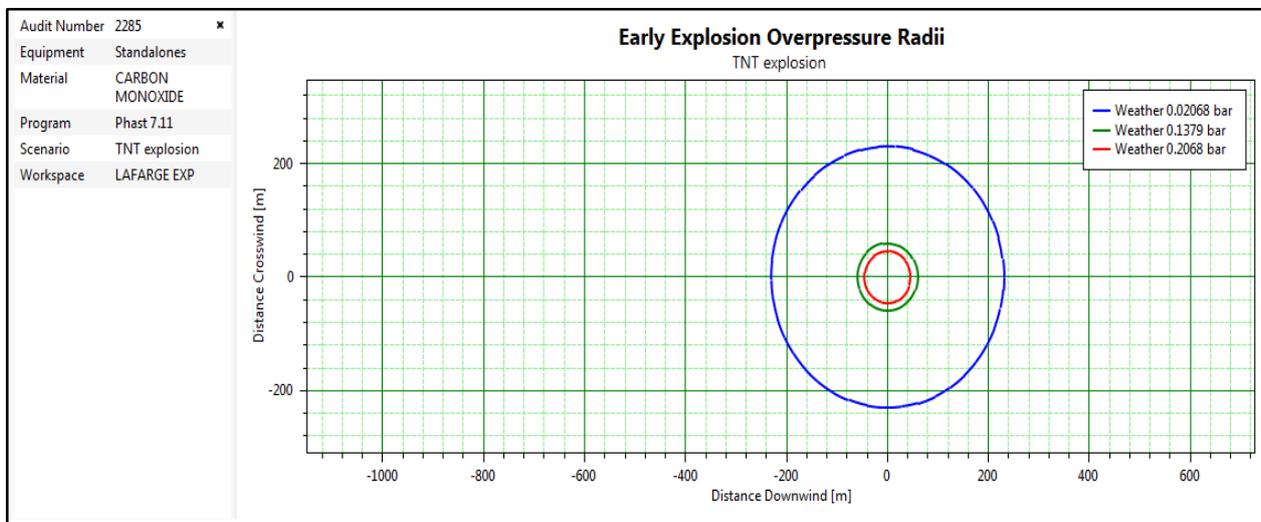


Figure 4-4 : Les zones de surpression en fonction des distances de l'explosion

Pour mieux illustrer les effets de la surpression nous avons superposé les contours des seuils de surpression critique sur la carte géographique du site la figure 4-5 projette la localisation des effets de surpression dans le site.



Figure 4-5 : Effets de surpression dans la zone (l'explosion de l'électro-filtre).

Les valeurs de référence de surpression, selon la réglementation française, pour les installations classées sont données dans le tableau 4-3 :

Tableau 4-3 : Effets de surpression sur l'homme et les structures

Seuil en (mbar)	Effets
20	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Des destructions significatives de vitres. ▪ Des effets irréversibles correspondant à la zone des effets indirects par bris de vitre sur l'homme.
50	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Des dégâts légers sur les structures. ▪ Des effets irréversibles correspondant à la zone des dangers significatifs pour la vie humaine.
140	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Des dégâts graves sur les structures. ▪ Des premiers effets létaux correspondant à la zone des dangers graves pour la vie humaine.
200	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Des effets domino. ▪ Des effets létaux significatifs correspondant à la zone des dangers très graves pour la vie humaine.

Interprétation des résultats du logiciel PHAST

Le rayon rouge est caractérisé par une distance de 40 m et une surpression de 0.21 bar d'après les seuils retenus dans le tableau 4-3, cette limite de surpression présente des dommages irréversibles et létaux aux personnes présentes dans le périmètre du premier cercle bien que la présence des travailleurs dans cette zone est interdite par la réglementation interne de l'usine. En plus, elle peut engendrer une destruction structurelle aux installations avoisinantes à partir de l'origine de l'explosion (Électro-filtre), nous citons :

- la tour de préchauffage
- la virole
- le précalcinateur où il y a une conduite de gaz naturel « effet domino »

Le rayon vert est caractérisé par une distance de 60 m et une surpression de 0.14 bar. Cette limite de surpression, bien qu'elle est inférieure à la première, reste dangereuse car elle est toujours supérieure au seuil de surpression susceptible de provoquer des dommages irréversibles, entraînant la mort des personnes et aussi la destruction des infrastructures. Les cibles présentes dans ce périmètre sont :

- les deux ateliers de maintenance
- le silo de la farine et le broyeur VRM
- Le nombre de travailleurs présents dans ce périmètre est de : 100 personnes

Le rayon bleu est caractérisé par une distance de 240 m et une surpression de 0.02 bar. À ce niveau-là, les dommages peuvent être moins graves sur les personnes (blessures), et sont insignifiants pour les structures (mur fissuré, glace brisée).

Nous confirmons grâce cette modélisation le caractère majeur de l'explosion de l'électro-filtre pouvant engendrer des dégâts humains et matériels. De ce fait, nous devons mettre en place un ensemble de moyens pour le contrer. Mais avant cela nous devons déterminer le facteur de réduction du risque à partir de la méthode graphe du risque qui sert à déterminer le niveau d'intégrité de sécurité d'un système proposé.

Ce chapitre nous a permis de modéliser les effets d'une explosion pouvant avoir lieu au niveau de l'électro-filtre, par le biais du logiciel PHAST.

Les résultats obtenus lors de cette simulation nous a donné un aperçu sur les effets de l'explosion. Nous avons constaté que la présence des hommes dans les périmètres critiques n'est pas intense, de ce fait, les pertes générées par un accident similaire vont se limiter à des pertes matérielles.

L'un des effets de la surpression est l'effet domino, malgré le fait que l'origine de l'explosion soit proche à celle de la conduite du gaz naturel, les effets dominos liés à l'explosion ne sont pas recensés en raison de la complexité de l'installation.

Chapitre 5
ACTIONS DE MAÎTRISE
DES RISQUES

ACTIONS DE MAÎTRISE DES RISQUES

La maîtrise des risques nécessite la mise en place des mesures de maîtrise des risques aussi communément appelées barrières de sécurité. Ces barrières de sécurité ont pour objectif de réduire la criticité des risques.

Pour minimiser la probabilité d'apparition d'une situation dangereuse dans notre cas « l'explosion de l'électro-filtre », on a eu recours à différents types de barrières de sécurité parmi ces derniers, on s'est orienté vers les Systèmes Instrumentés de Sécurité (SIS).

Pour concevoir ce SIS, il est nécessaire de prendre en considération le niveau de SIL requis à atteindre, qui est fixé par la méthode Graphe de risque étalonné.

Ce chapitre aura aussi pour objectif de juger de l'adéquation entre les barrières proposées et le niveau de risque visé, ceci est possible par l'emploi de la méthode LOPA.

5.1 Impact économique de l'arrêt de production

Dans le chapitre précédent nous avons vu que parmi les conséquences critiques pouvant résulter de développement de l'un des événements redoutés précédemment étudiés, est l'arrêt de production cette conséquence par le fait de l'arrêt consécutif de broyeur (VRM) et de four. Ces deux éléments clés dans le processus de la fabrication de ciment sont des systèmes complexes et d'une façon plus particulière lors des phases de démarrage et de l'arrêt.

La température immense dans le four de cuisson, qui est de l'ordre de 1400 °C, est atteinte d'une façon progressive. Cette augmentation de température est obtenue dans une période estimée de trois (03) jours (période d'échauffement). De même, le four nécessite trois (03) jours après son extinction pour qu'il se refroidisse.

Cette période perdue dans la phase de démarrage et l'arrêt du four est considéré comme une perte économique immense sachant que la production journalière d'environ 14000 t/jour qui est équivalente à 180 millions dinars par jour.

5.2 Impact économique de défaillance de la butée hydraulique

Le four rotatif admet une translation périodique selon son axe, celle-ci a pour rôle de répartir l'usure de ses composants, notamment l'usure de la couronne, le bandage et les galets.

La montée et la descente est assurée par la butée hydraulique ; or que la défaillance de cette dernière, peut générer le retour brusque du four ; ce phénomène de retour peut endommager les différents équipements du four. Par exemple, la rupture du galet implique des dommages économiques énormes. En effet, la rupture du galet dans un appui peut entraîner la rupture de la virole. Le changement de la virole nécessite 15 jours d'arrêt de production .De même, cet évènement peut entraîner un colmatage de la matière à l'intérieur du four, car la rotation du four devient impossible et celle-ci ne peut être évacuée, ce qui impliquera un changement des briques affectées après l'installation du galet, et nécessitera par conséquent 5 jours supplémentaires d'arrêt de production s'ajoutant à une période de 3 jours de refroidissement du four. Notons que le quart des briques installées seront affectées au cas du colmatage.

Pour conclure, la butée hydraulique est un équipement de grande importance dans le four, un endommagement de la butée est équivalent à une perte économique de 23 jours de production.

5.3 Proposition des solutions technologiques

LAFARGE dans toutes ses unités de production compte sur la maintenance préventive et corrective, une politique semblant pénible et nécessitant une main d'œuvre expertisée vue la complexité des équipements et le programme de production continue. Ses conditions de travail génèrent de stress et un malaise des travailleurs et par conséquent ces programmes ne sont pas efficaces.

Nous avons proposé des solutions techniques basées sur le principe de redondance pour éviter l'arrêt fréquent de production.

Après concertation avec les managers de Lafarge la possibilité de réaliser ses propositions dans l'usine de M'Sila ou dans des unités similaires.

Ces propositions considérées comme des barrières de sécurité. Avant qu'elles soient implémentées dans le process, Il est important que ces barrières répondent à un certain nombre d'exigences et révèlent un niveau de performance suffisant. Pour cela il faut faire appel à la vérification du niveau d'intégrité de sécurité en utilisant une méthode semi-quantitative : LOPA.

5.4 Layer Of Protection Analysis (LOPA)

Contrairement aux techniques d'évaluation des risques purement qualitatives, l'analyse des couches de protection permet d'estimer la fréquence d'un événement redouté. Cette méthode intègre les couches de protection de l'entreprise, tant organisationnelles que techniques.

La méthode LOPA évalue la réduction du risque en analysant la contribution des différentes couches (des caractéristiques intrinsèques du procédé jusqu'aux mesures de secours) en cas d'accident. Elle est utilisée pour déterminer quel SIL est assigné à chaque SIF et elle permet de déterminer combien de couches de protection sont nécessaires pour ramener le risque à un niveau tolérable. L'objectif est de calculer le risque résiduel exprimé en fréquence d'accident par an, ce qui impose de quantifier les fréquences d'occurrence des événements initiateurs et les probabilités de défaillances de chaque couche.

La méthode LOPA est une méthode semi-quantitative développée dans l'optique :

- de juger de l'adéquation entre les barrières mises en œuvre et le niveau de risque visé ;
- de statuer sur le besoin de mise en œuvre de nouvelles barrières ;
- de définir les « exigences » minimales sur la probabilité de défaillance des barrières à mettre en place dans le cas où les barrières existantes ne permettraient pas de justifier d'un risque acceptable ;
- d'évaluer la fréquence d'occurrence résiduelle d'un scénario d'accident [23].

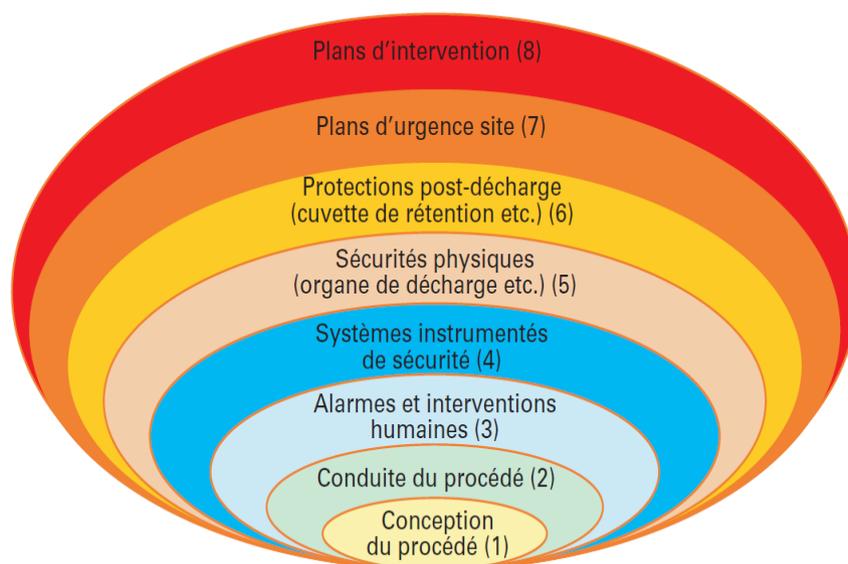


Figure 5-1 : Différentes couches de protection suivant LOPA [23]

5.5 Différents types de barrières de sécurités

Une maîtrise des risques au sein d'un process industriel, nécessite une instauration des barrières de sécurité ; celles-ci doivent être performantes et répondent à un certain niveau d'exigences fixé par des normes, et cela selon l'importance de process en question. Les barrières de sécurité sont mises en œuvre dans le but :

- de réduire la probabilité ou fréquence d'occurrence d'un scénario d'accident (barrières de prévention) ;
- de réduire l'intensité des effets associés à un scénario d'accident (barrières de mitigation ou protection) [24].

À titre de rappel, les barrières de sécurité doivent correspondre à l'une des trois catégories telles que définies dans le guide OMEGA 10 de l'INERIS :

- Barrières humaines ;
- Barrières techniques ;
- Systèmes à action manuelle de sécurité (SAMS) [24].

5.6 Notion de couche de protection indépendante

La méthode LOPA introduit la notion de couche de protection indépendante (IPL), la définition donnée par le CCPs est la suivante : « Une couche de protection indépendante (IPL) correspond à un équipement, un système ou une action capable de prévenir la survenue des conséquences associées à un scénario d'accident. Elle doit être indépendante de l'événement initiateur mais aussi de toutes les autres couches de protection associées au scénario ». En effet, pour le CCPs, ce terme englobe plusieurs critères de performances à savoir :

- Efficacité ;
- Temps de réponse ;
- Probabilité de défaillance.

Si pour une barrière, l'un de ces trois critères ne peut pas être vérifié, le CCPs recommande alors de ne pas la retenir en tant que IPL [23]. Le processus de sélection d'une barrière en tant que IPL suivant LOPA est donné par la figure 5-2 :

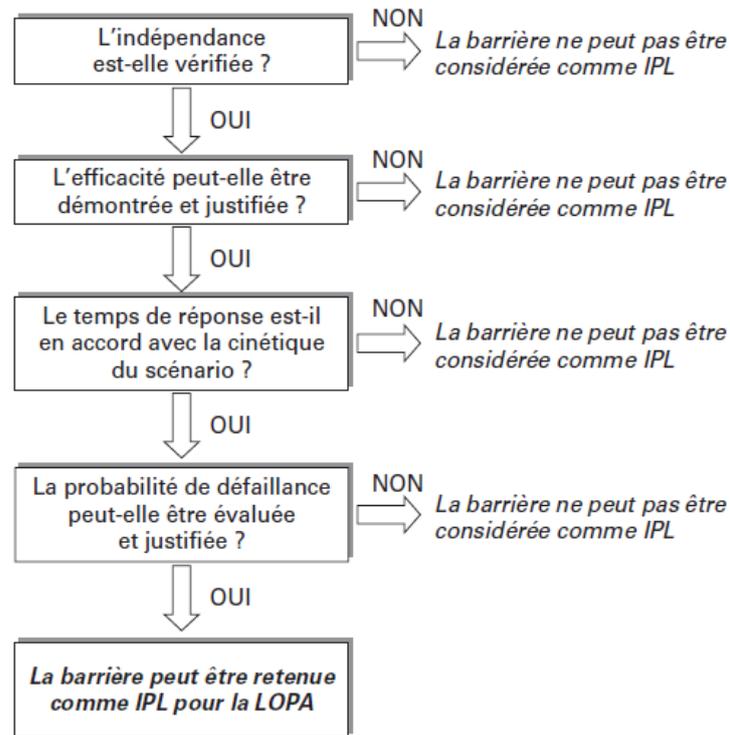


Figure 5-2 : Processus de sélection d'une barrière en tant que IPL suivant LOPA [23]

5.7 Mise en œuvre de la méthode LOPA

Après avoir identifié les scénarios par la méthode nœud papillon, et que cette dernière montre que le risque reste inacceptable, l'addition d'une ou plusieurs IPL(s) peut résoudre ce problème. Pour cela nous avons procédé à la mise en place de trois IPLs.

Scénario N° 01 :

- Généralement, la durée maximale d'intervention est de 8 heures, si le silo de farine est plein, durant cette période, les opérateurs de production doivent diminuer le débit du four pour permettre aux maintenanciers d'effectuer les travaux nécessaires. Cette diminution de débit peut provoquer le bourrage des cyclones. Nous proposons de mettre en place un troisième broyeur "réserve" entre les deux lignes de productions, et que sera utilisé pour remplacer le broyeur défaillant de l'un des de lignes de production. Dans ce cas, le silo est alimenté à partir de « VRM 03 » et l'équipe de maintenance aura le temps suffisant pour corriger le problème.

- Nous avons remarqué que les deux lignes de production ne sont pas interconnectées, nous proposons donc une inter-liaison entre les deux silos de farine tel que chacun assure l'alimentation de l'autre, cela donnera à l'équipe de maintenance le temps requis pour l'intervention, et nous évitons la variation de la vitesse du four qui provoque la concrétion de la matière, la figure 5-3 montre le principe de la liaison proposé :

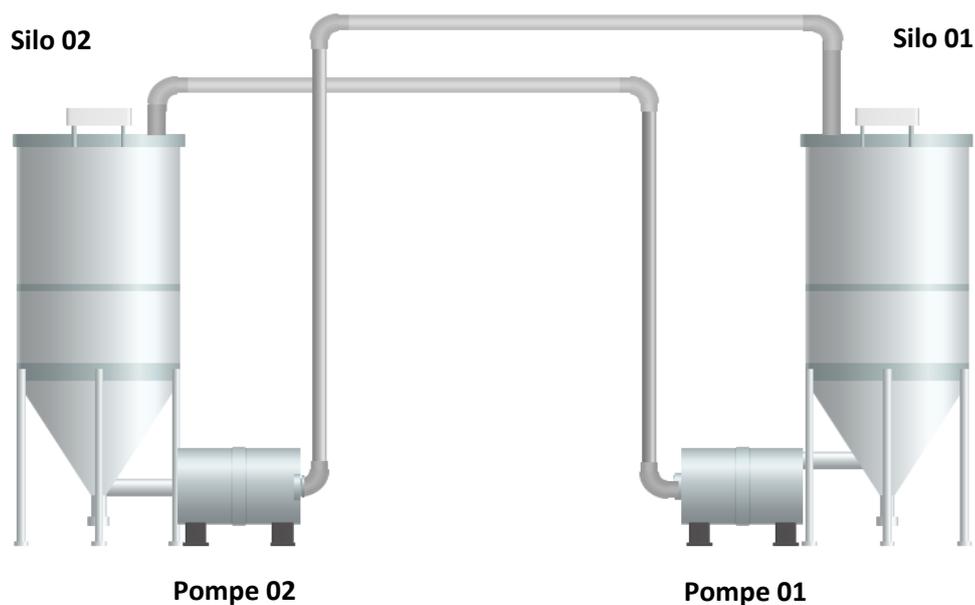


Figure 5-3 : Principe de connexion entre les deux lignes

Le tableau 5-1 représente la synthèse de l'analyse LOPA :

Tableau 5-1 : Tableau de synthèse du Scénario N° 01 selon CCPS

N° du scénario : 01	N° de l'équipement : FLS110	Titre du scénario : arrêt consécutif du four et production après un arrêt du broyeur	
Date : 28/04/17	Description	Probabilité	Fréquence
Conséquences/Niveau de gravité associé	Arrêt de production	9.22 × 10⁻⁴	
Fréquence « cible » pour atteindre le niveau de risque acceptable	Ce scénario entraîne une perte économique pour l'entreprise.		10⁻⁵

Événement initiateur du scénario	Arrêt de broyeur	9.22×10^{-2}	
Conditions de réalisation du scénario	-		
Facteurs conditionnels de réalisation (si applicables au scénario)	Probabilité de blessures mortelles		
	Probabilité de présence du personnel dans la zone d'effet atteinte par le scénario		
	Economique	1	
Fréquence du scénario sans les barrières			9.22×10^{-4}
Barrières de sécurité respectant les critères d'indépendances explicitées dans la méthode LOPA (IPL)	VRM 03	9.22×10^{-2}	
	Ligne de liaison	8.3×10^{-6}	
Autres barrières de sécurité ne respectant pas les critères d'indépendance explicités dans la méthode LOPA	-		
Total des PFD associées aux barrières de sécurité indépendantes (IPL)	-	7.6×10^{-7}	
Fréquence du scénario avec les barrières indépendantes			7×10^{-10}
La fréquence « cible » permettant de justifier d'un risque acceptable est-elle atteinte ? (Oui/Non) : Oui			
Actions requises pour atteindre le niveau de risque acceptable :			
Note :			
Références : AdD, AdE, Nœud papillon, LAFARGE.			
Identité des membres ayant participé à la revue LOPA : BEN KHALED Radhwane			

Scénario N° 02 :

- Après avoir réalisé une recherche inventaire auprès des différents fournisseurs des fours dans le monde, nous avons trouvé que le modèle japonais Kawasaki utilise deux butées :
 - la première est hydraulique pour donner le mouvement axial du four (figure 3-15)
 - La deuxième est fixe qui sera utilisée en cas de défaillance de la butée principale pour protéger les équipements du four (figure 5-4).

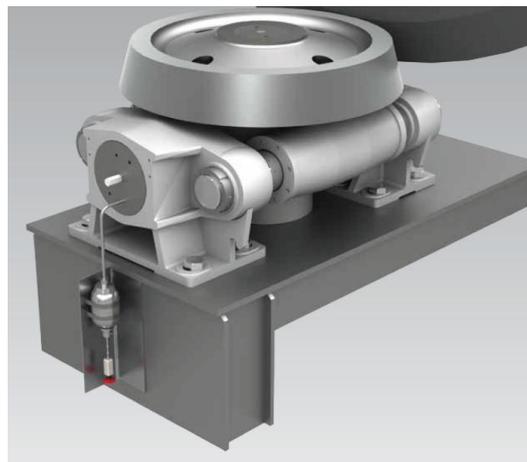


Figure 5-4 : Butée fixe [LAFARGE]

Le tableau 5-2 représente la synthèse de l'analyse LOPA :

Tableau 5-2 : Tableau de synthèse du Scénario N° 02 selon CCPS

N° du scénario : 02	N° de l'équipement : FLS124ATOX	Titre du scénario : Endommagement du four et arrêt de production à cause de défaillance de butée	
Date : 28/04/17	Description	Probabilité	Fréquence
Conséquences/Niveau de gravité associé	Endommagement du four	3.32× 10⁻⁴	
Fréquence « cible » pour atteindre le niveau de risque acceptable	Ce scénario entraine un risque pour l'installation et l'économie de l'entreprise		10⁻⁵

Événement initiateur du scénario	défaillance butée hydraulique	3.89×10^{-2}	
Conditions de réalisation du scénario	-		
Facteurs conditionnels de réalisation (si applicables au scénario)	Probabilité de blessures mortelles		
	L'usure de la couronne et le pignon, et le bandage et les galets	1	
	Economique	1	
Fréquence du scénario sans les barrières			3.32×10^{-4}
Barrières de sécurité respectant les critères d'indépendances explicitées dans la méthode LOPA (IPL)	Butée fixe	3×10^{-8}	
	Alarme	1.45×10^{-1}	
Autres barrières de sécurité ne respectant pas les critères d'indépendance explicités dans la méthode LOPA	-		
Total des PFD associées aux barrières de sécurité indépendantes (IPL)	-	4.35×10^{-9}	
Fréquence du scénario avec les barrières indépendantes	-		1.44×10^{-12}
La fréquence « cible » permettant de justifier d'un risque acceptable est-elle atteinte ? (Oui/Non) : Oui			
Actions requises pour atteindre le niveau de risque acceptable :			
Note :			
Références : AdD, AdE, Nœud papillon, LAFARGE.			
Identité des membres ayant participé à la revue LOPA : BEN KHALED Radhwane			

Conclusion :

La méthode LOPA nous a permis d'évaluer le système en termes de sécurité avant et après la proposition des barrières. L'instauration des différentes barrières proposées pour les deux scénarios les plus probables élaborés à partir de la méthode nœud papillon a contribué à la diminution de la probabilité engendrée par ces deux scénarios à un niveau largement inférieur au niveau tolérable.

5.8 Système instrumenté de sécurité (SIS)

Pour proposer un SIS, nous devons passer par trois étapes :

- Calculer le SIL requis du système ;
- Proposer l'architecture du SIS ;
- Confirmer que notre SIS correspond au SIL requis du système : Méthode d'allocation du niveau d'intégrité de sécurité.

Cette allocation est conduite selon certaines méthodes permettant de définir le niveau d'intégrité de sécurité (SIL) requis pour une fonction de sécurité. C'est le SIL qui doit être atteint par un SIS afin de réaliser la réduction nécessaire du niveau de risque. Nous allons, d'une part, expliquer la méthode graphe de risque, telle que présentée dans les normes CEI 61508, et de déterminer, d'autre part, le niveau d'intégrité de sécurité (SIL) correspondant à un phénomène dangereux spécifié (scénario d'accident) lors de la phase d'analyse des risques. Elle est plus ou moins adaptée en fonction du niveau de détail des analyses de risques réalisées (type et détail des informations disponibles). La CEI 61508, dans sa partie 5, décrit trois méthodes :

- Graphe de risque ;
- LOPA.

Dans ce cas, nous avons choisi d'appliquer la méthode graphe de risque étalonnée afin de déterminer le niveau d'intégrité de sécurité de notre système [25].

5.9 Calcul d'allocation du niveau d'intégrité de sécurité du SIL : graphe de risque

Le graphe de risque est une méthode semi- quantitative permettant de déterminer le niveau d'intégrité de sécurité d'un système relatif à la sécurité à partir des facteurs de risque connus associés à son système de commande.

Un certain nombre de paramètres de simplification sont introduits qui permettent de décrire la nature de la situation dangereuse lorsque les systèmes relatifs à la sécurité sont défailants ou non disponibles. Un paramètre est choisi parmi chacun des quatre groupes, et les paramètres sélectionnés sont alors associés pour décider du niveau d'intégrité de sécurité alloué aux systèmes relatifs à la sécurité.

La démarche est fondée sur l'équation caractérisant le risque (R) sans considérer les moyens instrumentés de sécurité :

$$R = f \times C \quad (5-1)$$

Où f et C sont respectivement la fréquence et la conséquence de l'évènement dangereux en l'absence de SIS.

Dans le cas présent, la fréquence de l'évènement dangereux « f » le résultat de trois facteurs exerçant une influence :

- Fréquence et durée d'exposition dans une zone dangereuse (F) ;
- La possibilité d'éviter l'évènement dangereux (P) ;
- La probabilité que l'évènement dangereux se produise en l'absence de systèmes relatifs à la sécurité (mais en présence de dispositifs externes de réduction de risque). C'est ce que l'on appelle la probabilité d'occurrence non souhaitée (W) [26].

Le tableau (5-3) étalonné donne les cas possibles à chaque paramètre du graphe de risque avec une cotation quantitative permettant de rendre le choix de chaque paramètre plus pertinent et exacte en se basant sur le résultat obtenu dans d'autre étude d'analyse (ADD, ADE) :

Tableau 5-3 : Etalonnage des paramètres du graphe de risque [26]

Paramètre de risque		Classification
Conséquence (C)	CA	Incident mineur
	CB	Effets réversibles
	CC	Effets létaux limités au site
	CD	Effets létaux en dehors du site
Occupation (F)	FA	Exposition rare dans la zone considérée
	FB	Exposition fréquente dans la zone considérée
Possibilité d'évitement (P)	PA	Possible sous certaines conditions
	PB	Impossible
Taux de demande (W)	W1	Faible probabilité (Accident pouvant se produire)
	W2	Probabilité moyenne (Accident, déjà observé)
	W3	Probabilité élevée (Accident fréquent, observé plus d'une fois)

La figure 5-5 offre l'exemple de la mise en œuvre d'un graphe de risque à partir du (tableau 5-3). En utilisant les paramètres C, F et P, on parvient à l'une des huit sorties. Chacune de ces sorties est mise en correspondance avec l'une des trois échelles (W₁, W₂ et W₃).

Chaque échelon (a, b, 1, 2, 3 et 4) indique la réduction de risque minimale à laquelle doit satisfaire le système relatif à la sécurité. Le résultat est obtenu en suivant les paramètres choisis sous forme de chemin dans le schéma du graphe de risque.

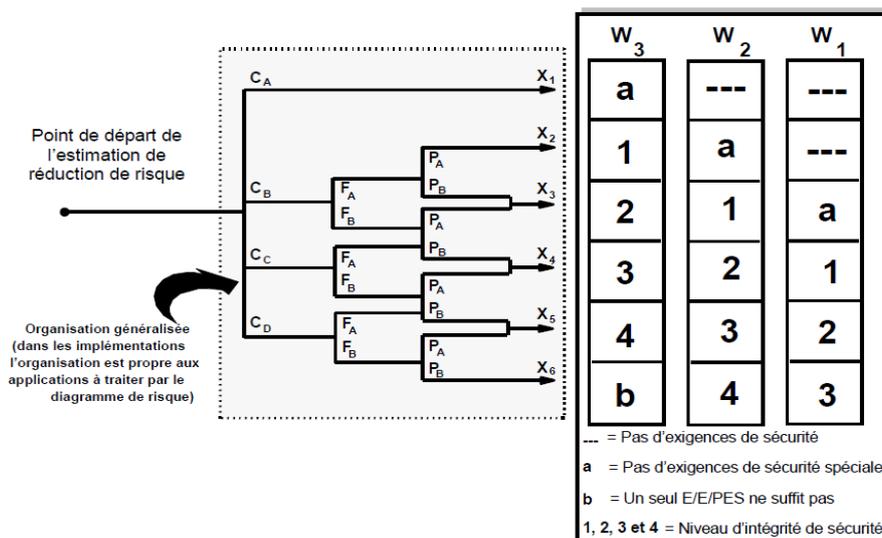


Figure 5-5 : Schéma général du graphe de risque [26]

5.10 Détermination du niveau d'intégrité de sécurité (SIL) du SIS associé au four rotatif

Le niveau d'intégrité de sécurité (SIL) de SIS que nous allons proposer sera obtenu par la méthode de graph des risques.

Justification du choix des paramètres

- Conséquence : le choix de niveau « critique » pour les conséquences a été basé sur les dommages que peut engendrer l'accident si il aura lieu, « Conséquences critiques » veut dire que l'accident peut causer des morts dans un périmètre n'excédant pas le site ; et des pertes financières dues à l'endommagement de l'installation.
- Occupation : la présence des employés dans le site en question est rares ; nous avons affecté « F_A » comme qualification de l'exposition.
- Possibilité d'évitement : Les mesures de sécurité appliquées dans l'entreprise permet d'éviter l'explosion, c'est pour cela que nous avons choisi le cas « possible dans certaines conditions ».
- Taux de demande : par un retour d'expérience, nous avons constaté que l'explosion a encore eu lieu dans des unités similaires. Nous avons affecté la classification « probabilité faible ».

En se basant sur les classifications préétablies, les résultats du graph de risques sont résumés dans le tableau (5-4).

Tableau 5-4 : Paramètres choisis pour la méthode graphe de risque étalonnée

Paramètres	Choix
Conséquence	Critique (Cc)
Occupation	F _A
Possibilité d'évitement	P _A
Taux de demande	W ₂

En suivant les paramètres, déjà fixés, sur le graph des risques, nous obtiendrons le niveau d'intégrité (SIL) de SIS proposé. La figure (5-6) nous montre le chemin suivi :

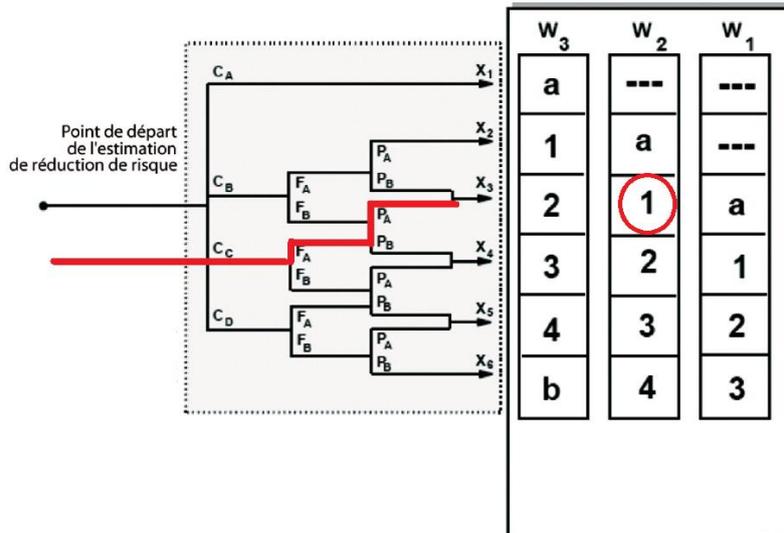


Figure 5-6 : Résultat de l'application la méthode graphe de risque

▪ **Résultat de la méthode graphe de risque étalonnée**

La détermination de niveau d'intégrité de sécurité par la méthode graphe des risques nous a donné un SIL de niveau 1. Le SIS proposé répond aux prescriptions du SIL 1. Le niveau d'intégrité de sécurité est la probabilité qu'un système destiné à accomplir une tâche relative à la sécurité de process fonctionne correctement en cas de sollicitation.

Le SIL est un niveau discret parmi quatre possibles permettant de spécifier les prescriptions concernant l'intégrité de sécurité des fonctions de sécurité à allouer aux systèmes relatifs à la sécurité. Le niveau 4 nécessite un investissement important et une technologie spécifique, le niveau 1 possède le niveau le plus bas.

Les niveaux de SIL sont représentés dans le tableau 5-5 :

Tableau 5-5 : Définition des niveaux SIL [25]

Niveau d'intégrité de sécurité	Mode de fonctionnement à faible sollicitation
1	$[10^{-1}, 10^{-2}]$
2	$[10^{-2}, 10^{-3}]$
3	$[10^{-3}, 10^{-4}]$
4	$[10^{-4}, 10^{-5}]$

5.11 Proposition d'un système instrumenté de sécurité (SIS)

Un SIS aura comme fonction d'assurer la mise en œuvre de fonctions instrumentées de sécurité (SIF) dont il est nécessaire de fixer un niveau d'intégrité à atteindre. Ce niveau dépend de la criticité de la situation dangereuse face à laquelle on positionne les SIF. On parle alors de niveau de SIL requis. Une fois cette première étape menée, il faut définir l'architecture de la SIF en prenant en compte les recommandations des normes IEC 61508 et 61511. Pour finir, un calcul de probabilité de défaillance de la SIF à partir des paramètres de fiabilité des éléments qui la compose (taux de défaillance, etc.) et des paramètres liés à la maintenance, tels que la période de test où le temps de réparation permet de s'assurer que le SIL requis est bien atteint [25].

Le guide OMEGA 10 définit les SIS comme suit : « *Les systèmes instrumentés de sécurité sont des combinaisons de capteurs, d'unité de traitement et d'actionneurs (équipements de sécurité) ayant pour objectif de remplir une fonction ou sous-fonction de sécurité. Un SIS nécessite une énergie extérieure pour initier ses composants et mener à bien sa fonction de sécurité* ».

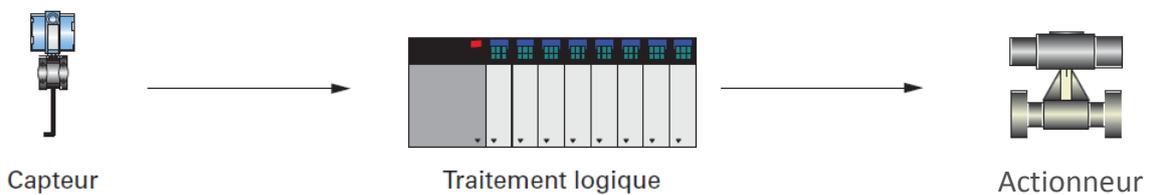


Figure 5-7 : Composants d'un SIS [25]

Un SIS met donc généralement en œuvre plusieurs SIF. La figure 5-8 présente le cas de deux SIF gérées par un même SIS.

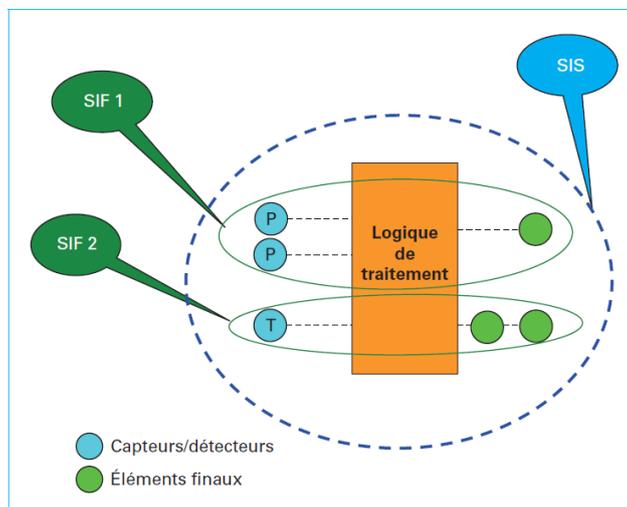


Figure 5-8 : Distinction entre SIS et SIF [25]

5.11.1 Architecture du Système Instrumenté de Sécurité proposé pour le four rotatif

Nous avons proposé un SIS pour éviter le risque causé par la défaillance de ventilateur "ID FAN" (figure 5-9). Les composants caractérisant notre SIS sont définis comme suit :

- **Capteur de Pression** : Le capteur placé au niveau de ventilateur indique la pression d'aspiration, en cas d'une déviation par rapport au fonctionnement normal, un signal sera envoyé à l'unité logique (PLC).
- **Actionneur** : la vanne électropneumatique placée dans la conduite principale du gaz naturel a pour rôle d'arrêter l'injection du gaz dans le four
- **Automate (PLC)** : Affiche la pression sur le tableau de commande et envoi le signal pour la fermeture de la vanne électropneumatique du gaz naturel après un temps bien déterminé (Arrêt alimentation du four en gaz naturel).

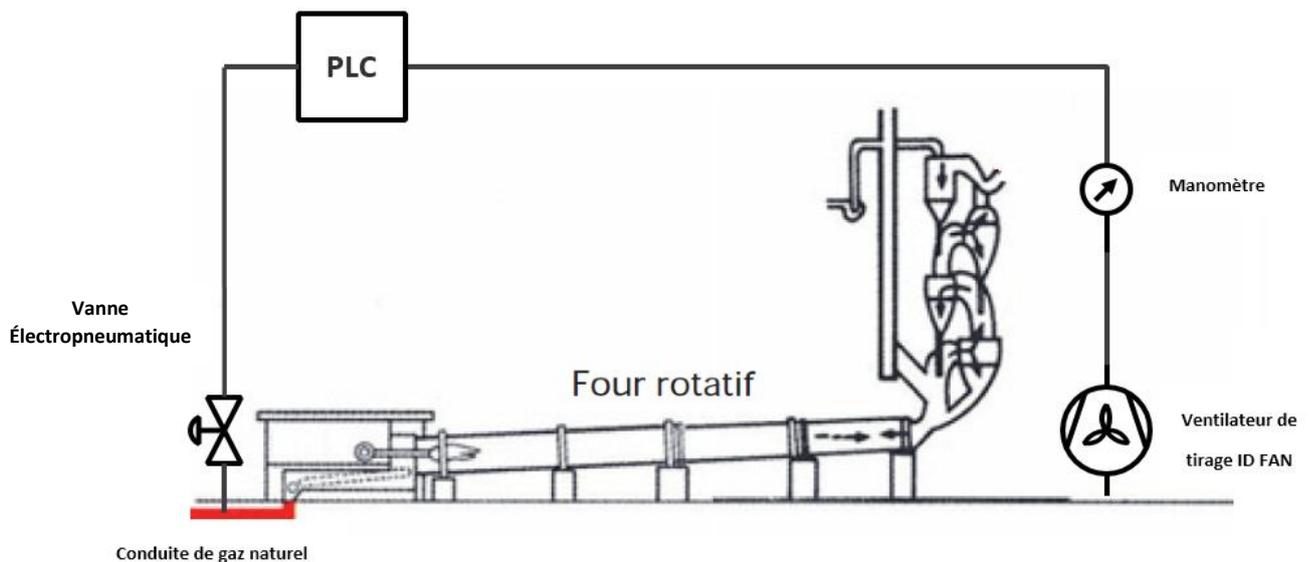


Figure 5-9 : Schéma du SIS proposé

▪ Fonctionnement du SIS :

Lorsqu'il y a une défaillance dans "ID FAN", le manomètre indique sur le tableau de commande, une pression d'aspiration égale à zéro ce qui désigne que les gaz ne circulent pas dans le four et la tour de préchauffage. Après 3 secondes l'unité logique (PLC) envoie un signal pour la fermeture de la vanne électropneumatique, et de ce fait, il n'y aura aucune injection du gaz naturel à l'intérieur du four.

5.11.2 Calcul du niveau d'intégrité de sécurité du SIS proposée avec « GRIF » :

Le logiciel GRIF est conçu pour différentes fonctions. L'un d'elle est de faire le calcul des PFD et des niveaux d'intégrités de sécurité (SIL). Il s'intéresse aussi au traitement des fonctions instrumentées de sécurité sur les installations à procès continu. Les calculs réalisés sont des calculs de sécurité, l'événement redouté est la défaillance dangereuse non-détectée de la fonction de sécurité du SIS [27].

Nous devons donner au logiciel l'architecture du SIS auquel nous voulons calculer le SIL, ensuite nous choisissons les types de composantes qui constitue notre SIS. Cela pour avoir un résultat (calcul SIL, PFD_{avg}) cohérent avec ce que nous voulons proposer.

Ce logiciel permet de nous confirmer si l'architecture du SIS que nous avons proposée répond aux exigences de sécurité de notre système.

Les paramètres utilisés dans le calcul du SIL sont des données de fiabilité, ces données ont été extraites de la base de données OREDA [19] et de la base de données [LAFARGE].

Tableau 5-6 : Donnée de fiabilité des éléments du SIS

	Mode de défaillance	λ (h ⁻¹) (Taux de défaillance)	TI (h) (Intervalle entre deux tests consécutifs)	MTTR(h) (Durée moyenne de réparation)
Capteur	Non fonctionnement sur demande	1.45 E-6	4380	8
Automate (PLC)	Défaut de l'automate	5 E-4	26280	24
Électrovanne	Non fermeture sur demande	1.5 E-6	8760	12

Après avoir choisi le type de composantes de notre SIS. Le logiciel GRIF nous affiche l'architecture du SIS. Cette dernière est représentée dans la figure 5-10 :

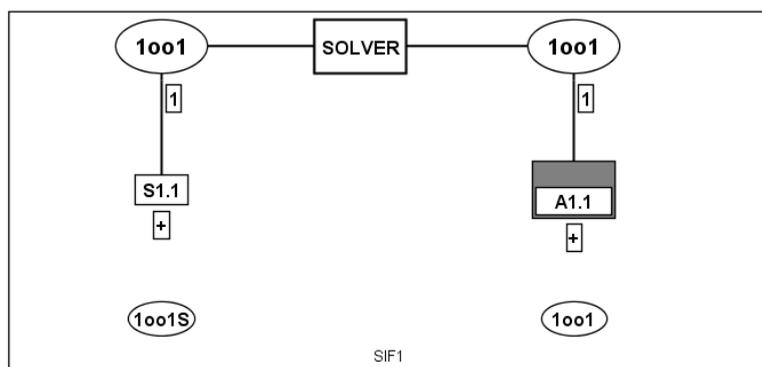


Figure 5-10 : Architecture du SIS proposé par GRIF

▪ **Résultat du logiciel GRIF :**

Après compilation des paramètres d'entrés, le rapport du logiciel GRIF nous a fourni le résultat suivant : Le tableau 5-7 nous donne les résultats obtenu pour chaque composantes lors du Calcul du SIL total de notre SIS :

Tableau 5-7 : Résultat donnée par le logiciel GRIF

	PFD_{avg}	SIL calculé	Contribution %
Partie Capteur(s)	2.94 E-02	1	30.46 %
Partie Solveur	5.00 E-02	1	10.11 %
Partie Actionneur(s)	1.51 E-03	2	59.44 %
SIF	2.66 E-02	1	100 %

Le logiciel GRIF nous a calculé la valeur du niveau d'intégrité de sécurité de notre système instrumenté de sécurité. Le rapport est donné par la figure 5-11 :

The screenshot shows the 'Rapport' tab of the GRIF software. It displays the following information:

- Configuration de l'architecture** / **Configuration des composants** / **Rapport** / **Paramètres**
- Descriptif** / **Résultat SIL** / **Spurious-trip**
- Pour la SIF (capteurs + solveur + actionneurs)**
 - Mode de sollicitation: Sollicitation rare (PFD)
 - Valeur SIL requis: 1
 - Valeur RRF requis: 10
- Valeur max SIL atteignable due aux contraintes architecturales - IEC 61511 (Ed2 2016)**
 - Capteurs: 2, HFT: 0
 - Actionneurs: 2, HFT: 0
- Calculs**
 - Durée d'exploitation (années): 30, PFD Avg: 2.6566E-2
 - SIL calculé: 1, RRF calculé: 37
- Résultats**
 - Valeur SIL réalisé: 1
 - Conclusion du SIL pour la SIF: Conforme

Figure 5-11 : Rapport donné par le logiciel GRIF après calcul du SIL

Comme il est si bien indiqué dans le rapport, notre niveau d'intégrité de sécurité (SIL=1) correspond au niveau d'intégrité de sécurité du système (SIL requis =1) qui a été calculé par la méthode graphe de risque étalonné.

5.12 Impact du SIS dans la réduction du risque de l'explosion

Dans le but de faire apparaître l'impact du SIS dans la probabilité d'apparition de ce Ph.D. Pour cela il faut faire appel à la vérification du niveau d'intégrité de sécurité en utilisant la méthode semi-quantitative « LOPA ».Le tableau 5-8 représente la synthèse de l'analyse LOPA

Tableau 5-8 : Tableau de synthèse du Scénario N° 03 selon CCPS

N° du scénario : 03	N° de l'équipement : FLS1224SIS	Titre du scénario : explosion de l'électro-filtre à cause de défaillance de " ID FAN "	
Date : 28/04/17	Description	Probabilité	Fréquence
Conséquences/Niveau de gravité associé	Explosion de l'électro-filtre	1.22 × 10⁻⁴	
Fréquence « cible » pour atteindre le niveau de risque acceptable	Ce scénario entraine un risque pour le personnel, l'installation et l'environnement.		10⁻⁵
Événement initiateur du scénario	Défaillance ventilateur " ID FAN "	1.43 × 10⁻¹	
Conditions de réalisation du scénario	-		
Facteurs conditionnels de réalisation (si applicables au scénario)	Probabilité d'explosion	1	
	Probabilité de présence du personnel dans la zone d'effet atteinte par le scénario	1	
	Probabilité de blessures	1	
	Economique	1	
Fréquence du scénario sans les barrières			1.22 × 10⁻⁴

Barrières de sécurité respectant les critères d'indépendances explicités dans la méthode LOPA (IPL)	Système Instrumenté de Sécurité (SIS) SIL=01	2.66×10^{-2}	
Autres barrières de sécurité ne respectant pas les critères d'indépendance explicités dans la méthode LOPA	-		
Total des PFD associées aux barrières de sécurité indépendantes (IPL)	-	2.66×10^{-2}	
Fréquence du scénario avec les barrières indépendantes	-		3.24×10^{-6}
La fréquence « cible » permettant de justifier d'un risque acceptable est-elle atteinte ? (Oui/Non) : Oui			
Actions requises pour atteindre le niveau de risque acceptable :			
Note :			
Références : AdD, AdE, Nœud papillon, GRIF, LAFARGE.			
Identité des membres ayant participé à la revue LOPA : BEN KHALED Radhwane			

En appliquant la méthode LOPA, sur notre système et en introduisant le SIS proposé, nous remarquons que la probabilité l'avènement de phénomène dangereux à diminuer à 3.24×10^{-6} . La valeur étant suffisamment inférieure au seuil acceptable, la situation du système en termes de sécurité face à ce phénomène est jugé acceptable.

CONCLUSION GÉNÉRALE

CONCLUSION GÉNÉRALE

Le travail effectué pour la maîtrise des risques dans LAFARGE ciment de M'Sila nous a permis de mettre en place une démarche d'analyse des risques par approche de sûreté de fonctionnement

Afin d'atteindre les objectifs de cette étude, nous avons suivi un enchaînement logique qui consistait à l'utilisation d'un ensemble de méthodes et de techniques soigneusement choisies pour arriver à une maîtrise efficiente et économiquement raisonnable et ce après avoir détaillé un ensemble de notions et de concepts de base.

Dans le chapitre 1, nous avons donné les moyens qui ont permis de bien comprendre le processus de notre système et mieux définir la méthodologie à suivre dans le but d'apporter des réponses à notre problématique.

Dans le chapitre 2, nous avons élaboré une démarche de gestion des risques qui a comme finalité la maîtrise de ces derniers et nécessite le déploiement d'une analyse pour identifier les sources de danger et estimer la criticité des risques retenus.

Le chapitre 3, nous avons mis en œuvre dans un premier lieu une analyse PARETO pour identifier les systèmes critiques, ensuite nous avons établis des arbres de défaillances et d'évènements pour les ERs :

- Défaillance de réducteur de commande (VRM) : $2.04E-4$
- Défaillance de l'élevateur de farine (VRM) : $5.09E-02$ (évènement le plus probable)
- Bourrage du cyclone (Four) : $3.21E-01$ (évènement le plus probable)
- Défaillance de la Butée hydraulique (Four) : $3.89E-02$

Enfin, nous avons élaboré des scénarios d'accidents par la méthode nœud papillon. Le scénario choisi est la défaillance de "l'ID FAN " avec une probabilité de 1.43×10^{-1} qui va provoquer une accumulation des gaz due à une mauvaise combustion dans le four.

Dans le chapitre 4, nous avons modélisé les effets de surpression due à l'explosion de monoxyde de carbone dans l'électro-filtre et nous avons montré la gravité des conséquences engendrées sur l'installation. Cette étude nous a permis de repérer les zones les plus sensibles et les plus critiques pouvant être à l'origine et les cibles d'un accident majeur. Ces cibles les plus concernés par l'explosion sont en nombre de trois :

- la tour de préchauffage ;
- la virole ;
- le précalcinateur.

Le four rotatif est un élément important dans la cimenterie. Les défaillances au niveau du four peuvent être causées par des mauvais fonctionnements des équipements se trouvant en amont entraînant ainsi des pertes importantes de production. Les principales défaillances sont :

- Défaillance du broyeur vertical (VRM) ;
- Défaillance butée hydraulique ;
- Bourrage du cyclone.

Pour remédier à ces problèmes, nous avons proposés, dans le chapitre 5, des solutions techniques et qui sont :

- Troisième broyeur vertical (VRM 03) ;
- Connexion entre les deux lignes ;
- Butée fixe.

Nous avons proposé un Système Instrumenté de sécurité (SIS) pour réduire la probabilité du risque d'explosion au niveau de l'électro-filtre. Pour cela, nous avons :

- Calculer l'allocation du SIL requis à l'aide de la méthode Graphe de risque soit $SIL=1$;
- Proposer une architecture du SIS ;
- Confirmer le SIL de l'architecture proposée avec le logiciel GRIF.

L'évaluation des risques par l'emploi de la méthode LOPA sur les différentes propositions techniques citées en chapitre 5, nous a permis d'analyser les barrières et de juger si elles sont adéquates en comparant la fréquence d'occurrence résiduel du scénario avec la fréquence cible obtenu par un critère d'acceptabilité propre au Groupe LAFRAGE.

Enfin, pour une perspective d'amélioration continue, nous proposons de formaliser, capitaliser et généraliser la démarche que nous avons mise en œuvre à l'ensemble des industries de cimenteries.

Références bibliographiques

- [1] ARIA, accidents-cimenterie 2017, consulté le 02/04/2017 ;
lien : <http://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/resultat-recherche-accident/>.
- [2] Planetoscope, « *Production mondiale de ciment* », consulté le 02/04/2017; lien:
www.planetoscope.com/matieres-premieres/1708-production-mondiale-de-ciment.html .
- [3] The Global Cement Directory, consulté le 02/04/2017 ; lien : <http://www.globalcement.com>
- [4] International Trade Centre (ITC), consulté le 02/04/2017 ;
lien : <http://www.intracen.org/itc/market-info-tools/trade-statistics/>.
- [5] Joseph, A., 2008,« *Ciments* », Techniques de l'ingénieur (ref. article : C920).
- [6] Robert, B., Alexandre, B., Bernard, G., 2000,« *Fours de cimenterie- Ateliers de cuisson du clinker* », Techniques de l'ingénieur (ref. article : BE8844).
- [7] Robert, B., Alexandre, B, Bernard, G, 2001,« *Fours de cimenterie- Fours rotatifs* », Techniques de l'ingénieur (ref. article : BE8845).
- [8] Robert, B., Alexandre, B, Bernard, G, 2000,« *Fours de cimenterie- Refroidisseurs à clinker* », Techniques de l'ingénieur (ref. article : BE8846).
- [9] OHSAS18001, 2007, « *Système de management de la santé et de la sécurité au travail - Exigences* », BSI.
- [10] Villemeur, A., 1997, « *Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels* », Edition Eyrolles.
- [11] Yves, M., 2001,« *La sûreté de fonctionnement : méthodes pour maîtriser les risques* », Techniques de l'ingénieur (ref. article : AG4670).
- [12] Yvan,V., 2001, « *Retour d'expérience dans les industries de procédé* », Techniques de l'ingénieur (ref. article : AG4610).
- [13] Gilles, Z.,2014,« *Évaluation de la criticité des équipements. Méthodes analytiques*», Techniques de l'ingénieur (ref. article : SE4005).
- [14] Olivier, I., 2015, « *Nœud papillon : une méthode de quantification du risque* », Techniques de l'ingénieur (ref. article : SE4055).

- [15] Yves, M., 2002, « *Arbres de défaillance, des causes et d'événement* », Techniques de l'ingénieur (ref. article : SE4050).
- [16] Miles, L.D., (1972), « *Techniques of Value Analysis and Engineering* », McGraw-Hill.
- [17] Edmond, L., 2001, « *Méthodes et outils de la qualité* », Techniques de l'ingénieur, (ref. article : AG1770).
- [18] International Business Machines (IBM), « *Maximo Asset Management software* », consulté le 08/04/2017; lien: www.ibm.com/software/products/fr/maximoassetmanagement
- [19] Companies: ENI S.p.A/AGIP Exploration & Production- BP Exploration Operating Company-ExxonMobil International- Norsk Hydro ASA- Phlipps Petroleum Company Norway- Statoil ASA-Shell Exploration & Production- Total Final Elf, 2002, OREDA, Offshore Reliability Data Handbook, 4ème Edition.
- [20] TOTAL, 3 Avril 2017, Manuelle d'utilisation : Logiciel GRIF - Arbre de défaillance.
- [21] Groupement Français de Combustion, consulté le 01/05/2017 ; lien:www.combustioninstitute.fr/index.php
- [22] Mouilleau, Y., lechaudel, J.F., INRIS-juillet 1999, Guide des méthodes d'évaluation des effets d'une explosion de gaz à l'air libre.
- [23] Olivier, I., 2012, « *Méthode LOPA : principe et exemple d'application* », Techniques de l'ingénieur, (ref. article : SE 4075).
- [24] INERIS, 2008, Evaluation des Barrières Techniques de Sécurité, OMEGA 10 (Ω 10).
- [25] Olivier, I., 2015, « *Probabilité de défaillance à la sollicitation d'une fonction instrumentée de sécurité* », Techniques de l'ingénieur, (ref. article : SE 4058).
- [26] Lanternier, B., Adjadj, A., 2008, « *Revue internationale sur l'Ingénierie des Risques Industriels* », Institut Nationale de l'Environnement Industriel et des Risques, DCE/LEEL Verneuil en Halatte – France.
- [27] TOTAL, 3 Avril 2017, Manuelle d'utilisation : Logiciel GRIF - Module SIL.

ANNEXE A

Analyse des défaillances (VRM)

Sous-système	Indice de	Déteçtabilité	Durée d'intervention	Niveau de production	Maintenabilité	Fréquence	Score
Détérioration des équipements internes	Détachement blindage galet	2	2	4	3	4	192
	Fissure de clamp des galets	3	1	4	1	4	48
	Blocage des roulements galets	4	4	4	3	2	384
	Détérioration de la blindage de la table	4	2	4	3	2	192
système de tansion	Cisaillage de la tige de vérin	1	1	4	1	4	16
	Usure piston vérin	1	1	4	1	2	8
Centrale hydraulique	Dysfonctionnement de la pompe	1	1	4	1	1	4
	Accumulateur	1	1	4	1	4	16
Groupe de commande (RDC)	Grippage des roulements du réducteur de commande	2	3	4	4	2	192
	Cassure de dentures pignon	2	4	4	4	1	128
	Cisaillage des axes du RDC	2	4	4	4	1	128
	Grippage des roulements du moteur	2	1	4	1	2	16
Séparateur	Usure casing	4	1	1	1	4	16
	endommagement les roulements de rotor	1	1	4	3	2	24
	Usure cônes	4	1	1	3	2	24
Gratteur							
Groupe de transmission	Défaillance d'accouplement	1	1	1	1	1	1
	Réducteur	4	2	1	1	1	8
Moteur H.S	Usure/Cassure palier roulement	1	1	1	1	1	1
	Défaillance de la cag	1	1	1	1	1	1
Problème dans la chaîne	Usure/cassure d e la roue dentée	4	2	1	1	1	8
	Cassure/Usure million	1	1	1	1	1	1
Herses	Déformation charpente	1	2	1	1	1	2
	Rupture câble	1	1	1	1	1	1
	Défaillance du réducteur de commande	4	1	1	1	1	4
Transporteur							
Arrêt moteur		2	1	1	1	1	2
Groupe de transmission		1	1	1	1	1	1
	Usure/Cassure tambour	1	1	1	1	1	1
Bande	Usure/Cassure roulement	4	1	1	1	1	4
	Déchirure/Décollage bande	1	1	1	1	1	1
	Usure/Cassure rouleau	1	1	1	1	1	1
Transport du produit fini							
Aéroglossière	Usure de la toile	1	1	3	1	2	6
Ventilateur H.S	Vibration	1	1	2	2	2	8
	Cramage moteur	3	1	4	1	2	24
Problème dans la pompe IBAU	Usure coquille	4	1	1	1	2	8
	Usure de la vis	4	1	2	1	2	16
	Vibration de la vis	1	1	2	2	2	8
	Grippage roulement boîte à palier	1	1	4	1	2	8
	Usure de clapet sortie pompe	4	1	4	1	2	32
	Ph de réducteur	4	1	4	1	2	32
Élévateur	Roulement du tambour grippé	4	1	4	1	2	32
	Déformation godet	4	1	4	1	2	32
	Rupture de la bande	4	4	4	2	2	256
	Grippage roulement	1	1	4	1	1	4
Compresseur H.S	Usure et blocage vis	4	1	4	3	1	48
	Ph de pignon multiplicateur	4	1	4	3	1	48
	Ph de graissage	1	1	4	1	1	4

Analyse des défaillances (Atelier cuisson)

Sous-système	Indice de	Déteçtabilité	Durée d'intervention	Niveau de production	Maintenabilité	frequence	Score
verole	Fissuration circulaire/longitudinale	4	1	1	3	4	48
	Déformation	4	1	4	3	1	48
	Ovalisation	1	2	4	1	1	8
	Déviatiion de l'axe	1	2	4	3	1	24
Les briques	Usure des briques	4	1	4	3	1	48
	Chute des briques	4	1	4	3	1	48
Joint amont	Usure des écailles	4	1	1	3	2	24
	Usure de la piste	4	1	1	3	2	24
Joint aval	Usure des écailles	4	1	1	3	2	24
	Usure de la piste	4	1	1	3	2	24
	Fissures de la fausse verole	3	3	4	1	1	36
Réducteur	Diminution de la viscosité d'huile	1	1	1	1	4	4
	Usure des dents	4	1	1	1	1	4
Pignon	Usure des dents	4	1	1	1	1	4
Couronne	Usure des dents	4	1	1	1	1	4
Plaques nose-ring	Usure des plaques	4	1	4	1	1	16
les Cyclones	Calssination des jupes des cyclones	4	4	4	3	1	192
	bourage matiere	3	3	4	3	4	432
	calssination des gaines sous cyclones	4	2	2	1	3	48
Ventillateur ID FAN	Usure de l'arbre ventilateur	4	2	1	1	4	32
	Grippage des roulements	3	4	4	3	3	432
	L'endommagement des paliers	3	4	4	3	1	144
Butée hydraulique	Rupture des vis	4	3	4	1	4	192
	Grippage des roulements	4	3	4	1	4	192
	Chute de pression de descente	3	1	1	1	2	6
Bandage	Fissuration	4	2	4	1	1	32
	Glissement incorrecte	1	2	4	3	1	24
	Bandage oscillant	1	2	4	3	1	24
	Usure des plaques de compensations	4	1	4	1	1	16
	Rupture des blocs de poussée	4	2	4	1	1	32
	Usure des cerces du bandage	4	2	4	1	1	32
	Rupture fragile	4	1	4	1	1	16
Galet	Flexion excessive	4	1	4	1	1	16
	Inclinaison axe galet/axe bandage	4	2	4	1	1	32
	Ecaillage de la surface du galet	4	2	4	1	1	32