



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique

جامعة وهران 2 محمد بن أحمد  
Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed  
معهد الصيانة والأمن الصناعي  
Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle

Département : Sécurité industriel et environnement

## MÉMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Hygiène et sécurité industriel

Spécialité : Prévention / Intervention

### Thème

# ANALYSE DES RISQUES DES SILOS AGRO-ALIMENTAIRE

Présenté et soutenu publiquement par :

BESSADET Mouad

BOUABCA Youcef

Devant le jury composé de :			
Nom et Prénom	Grade	Établissement	Qualité
TALBI Zahira	MCB	IMSI / UNIV Oran 2	Président
BENOMAR Fatima	MAA	IMSI / UNIV Oran 2	Encadreur
BOUHAFS Mohamed	MCB	IMSI / UNIV Oran 2	Examinateur

Année : 2020/2021

## Résumé

Les silos agroalimentaires présentent des risques majeurs d'explosions, dont 48% sont au niveau de l'élévateur à godet. Les travaux de recherche menés dans le cadre de ce mémoire fournissent une étude analytique basée sur la méthode de l'arbre de défaillance afin de déterminer les événements de base qui conduisent à l'occurrence d'explosion d'élévateur à godet à l'aide du programme arbre-analyste. Une étude probabiliste par les réseaux bayésien a été développée pour extraire un ensemble de probabilités à posteriori utilisant logiciel MSBNx de MICROSOFT. Enfin une comparaison entre les deux méthodes en utilisant les facteurs d'importances de Brinbuam et de criticité. Tous ces travaux visent principalement à trouver les causes les plus importantes qui affectent grandement l'émergence de ce type d'accident et à essayer de mettre en place des mesures préventives pour éviter ce type de risque.

*Les mots clés : les silos agroalimentaires, risque majeur, explosion, analyse quantitative, Arbre de défaillance, réseau bayésien, facteurs d'importances,*

## Abstract

Agri-food silos present major risks of explosions, where are 48% at the bucket elevator level according to return of experience. The research work carried out within the framework of this thesis provides an analytical study was carried out using the failure tree in order to determine the basic events that could leading to the occurrence of bucket Elevator Explosion with the help of the tree-analyst program. At the end of this work, a Bayesian network was developed to define more precise knowledge and extract a set of posteriori probabilities, the Birnbaum factors and criticality factor using MSBNx software from MICROSOFT. All of this work focuses on finding the most important causes that greatly affect the emergence of this type of accident and trying to put preventive measures in place to avoid this type of risk.

*Keywords: Agri-food silos, Major risk, explosion, Quantitative Risk Analysis, ADD, Bayesian Networks Probabilistic, Importance Factors.*

# REMERCIEMENTS :

En préambule à ce mémoire nous remerciant ALLAH qui nous a aidé et nous a donné la patience et le courage durant ces longues années d'étude.

Nous tenons à remercier sincèrement Madame BENOMAR qui, en tant qu'encadrant de mémoire, elle a toujours montré l'écoute et la disponibilité tout au long de la réalisation de ce mémoire

Nous adressons nos remerciements aux membres du jury qui ont accepté de faire soutenir ce mémoire.

Nous souhaitant adresser nos remerciements les plus sincères aux personnes qui nous ont apporté leur aide et qui ont contribué à l'élaboration de ce mémoire ainsi qu'à la réussite de cette formidable année universitaire.

On n'oublie pas nos parents pour leur contribution, leur soutien et leur patience. Enfin, nous adressons nos plus sincères remerciements à tous nos proches et amis, qui nous ont toujours encouragés au cours de la réalisation de ce mémoire. Merci à toutes et à tous.

**Youcef Bouabça & Bessadet Mouad**

# DEDICACES

Je dédie ce mémoire à :

Mes très chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour,  
leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de  
mes études,

Mon frère Elhadj et ma sœur Zohra pour leurs aides et  
encouragement multiples tout au long mon parcours  
universitaire,

Mon binôme Mouad,

Mes nombreux amis du groupe « la Cav » pour leur  
encouragements et soutien moral

Mes camarades, amis et connaissances,

Tous ceux qui de près ou de loin ont contribué à  
l'accomplissement de ce travail.

BOUABCA  
Youcef

# DEDICACES

Je dédie cet événement marquant de ma vie à :

La mémoire de mon chère père disparu de ce monde, celui  
qui m'a fait de moi un homme,

J'espère que Dieu t'accueille dans son vaste paradis.

L'être le plus chère de ma vie qui me soutenir pour réussir  
mes ambitions, ma chère mère.

Mes chers frères et ma chère sœur.

Mon binôme Youcef

Tous mes amis de la chambre D<sub>53</sub>.

Toute personne qui occupe une place dans mon cœur.

Tous les membre de ma famille et toute personne qui  
porte le nom **BESSADET**, je dédie ce travail à tous qui  
ceux qui ont participé à ma réussite.

BESSADET

Mouad

# TABLE DES MATIERES

<b>Résumé .....</b>	<b>I</b>
<b>REMERCIEMENTS : .....</b>	<b>II</b>
<b>DEDICACES .....</b>	<b>III</b>
<b>INTRODUCTION GENERALE .....</b>	<b>1</b>
<b>CHAPITRE I : Démarche et méthodes d'analyse des risques. ....</b>	<b>3</b>
1. INTRODUCTION.....	4
2. NOTION ET CONCEPTS .....	4
2.1. NOTION DE DANGER .....	4
2.2. NOTION DE RISQUE .....	4
2.3. SITUATION DANGEREUSE : .....	5
2.4. NOTION D'ACCIDENT.....	5
2.5. NOTION DE DOMMAGE : .....	6
2.6. NOTION DE SECURITE.....	6
3. PRINCIPES POUR LA GESTION DES RISQUES .....	7
3.1. ANALYSE DES RISQUES .....	7
3.2. EVALUATION DU RISQUE .....	8
3.3. CLASSIFICATION DES RISQUES : .....	8
3.4. REDUCTION DU RISQUE .....	9
4. DEMARCHE POUR L'ANALYSE DES RISQUES ASSOCIES A DES INSTALLATIONS INDUSTRIELLES .....	9
4.1. DEFINITION DU SYSTEME ET DES OBJECTIFS A ATTEINDRE .....	10
4.2. RECUEIL DES INFORMATIONS INDISPENSABLES A L'ANALYSE DES RISQUES .....	10
4.3. DEFINITION DE LA DEMARCHE A METTRE EN OEUVRE.....	12
5. LES METHODES CLASSIQUES D'ANALYSE DES RISQUES .....	15
5.1. ANALYSE PRELIMINAIRE DES RISQUES (APR) .....	16
5.2. AMDE ET AMDEC .....	17
5.3. HAZOP.....	18
5.4. ARBRE DES DEFAILLANCES.....	20
5.5. L'ANALYSE DE DYSFONCTIONNEMENT PAR LES OUTILS DE LA THEORIE STOCHASTIQUE : .....	30
6. CONCLUSION : .....	36
<b>CHAPITRE II : Présentation générale du silo agro-alimentaire.....</b>	<b>37</b>
1. INTRODUCTION.....	38
2. JUSTIFICATION DU CHOIX DU THEME .....	38
3. BASE REGLEMENTAIRE RELATIF AUX SILOS AGROALIMENTAIRES : .....	39
3.1. REGLEMENTATIONS NATIONALES ALGERIENNES : .....	39
3.2. REGLEMENTATION FRANÇAISE.....	40
4. SCHÉMA GÉNÉRAL D'UN ÉTABLISSEMENT STOCKEUSE.....	44

# TABLE DES MATIERES

5.	ACTIVITE DE STOCKAGE.....	46
5.1.	TYPES DE CELLULES OU DE CAPACITES DE STOCKAGE.....	46
5.2.	LES TOURS DE MANUTENTION .....	49
5.3.	LES GALERIES DE MANUTENTION .....	49
5.4.	LES POSTES DE RECEPTION .....	49
5.5.	LES POSTES D'EXPEDITION .....	50
5.6.	LES DISPOSITIFS DE TRANSPORT ET DE DISTRIBUTION .....	50
5.7.	L'ENSILAGE DES CELLULES .....	54
5.8.	LA VIDANGE DES CELLULES .....	54
5.9.	NETTOYAGE DES PRODUITS .....	55
5.10.	LA VENTILATION .....	57
5.11.	LE DEPOUSSIERAGE .....	58
5.12.	ALIMENTATION EN ENERGIE .....	60
5.13.	SALLE DE CONTROLE, COMMANDE.....	60
6.	ACTIVITES CONNEXES .....	60
6.1.	SECHOIRS.....	60
6.2.	ATELIERS .....	62
7.	ACTIVITES ANNEXES.....	62
8.	CONCLUSION .....	62

## **CHAPITRE III : Description du phénomène d'explosion et application de l'arbre de défaillance ..... 63**

1.	INTRODUCTION.....	64
2.	ACCIDENTOLOGIE GENERALE SILO.....	64
2.1.	ACCIDENTS MARQUANTS.....	66
2.2.	CAUSES D'ACCIDENTS .....	68
3.	DESCRIPTION DU PHENOMENE D'EXPLOSION .....	70
3.1.	DEFINITIONS .....	70
4.	CONDITIONS NECESSAIRES DU PHENOMENE.....	71
4.1.	POUSSIERES COMBUSTIBLES .....	71
4.2.	PRESENCE D'OXYGENE.....	71
4.3.	MISE EN SUSPENSION : .....	72
4.4.	DOMAINE D'EXPLOSIVITE.....	72
4.5.	CONFINEMENT : .....	72
4.6.	SOURCES D'INFLAMMATION : .....	72
5.	DEROULEMENT D'EXPLOSION POUSSIERES .....	74
5.1.	ALLUMAGE.....	74
5.2.	PROPAGATION .....	75
5.3.	EXPLOSION : .....	75

# TABLE DES MATIERES

6. MESURES PREVENTIVES DES EXPLOSIONS DE POUSSIÈRES DANS LES INSTALLATIONS AGRICOLES (SELON LA NORME NFPA 61).....	75
6.1. DISPOSITIONS CONSTRUCTIVES.....	75
6.2. VENTILATION DE L'ATMOSPHERE.....	75
6.3. PREVENTION DES EXPLOSIONS, EVENTS ET SURFACES SOUFFLABLES.....	76
<b>SECTION II : PARTIE PRATIQUE .....</b>	<b>78</b>
1. CRITERE DE CHOIX DE SCENARIO.....	78
2. EXPLOITATION DE REX : .....	80
2.1. DEFINITION DE REX : .....	80
2.2. RETOUR D'EXPERIENCE SUR LES ACCIDENTS IMPLIQUANTS DES EXPLOSIONS D'ELEVATEURS A GODETS.....	80
3. ARBRE DE DEFAILLANCE D'EXPLOSION D'ELEVATEUR A GODET PAR LOGICIEL ARBRE ANALYSTE WIN2-3-2 :.....	82
4. JUSTIFICATION DE CHOIX DE LA METHODE ARBRE DE DEFAILLANCE :.....	82
4.1. CONSTRUCTION DE L'ARBRE : .....	83
4.2. PROBABILITES DES EVENEMENTS : .....	84
4.3. MESURES D'IMPORTANCE : .....	85
4.4. DESCRIPTION STRUCTURELLE DE L'ARBRE : .....	86
4.5. ANALYSE QUANTITATIVE :.....	86
5. CONCLUSION.....	89
<b>CHAPITRE IV : Application du Réseau Bayésienne.....</b>	<b>90</b>
1. INTRODUCTION.....	91
2. JUSTIFICATION DU CHOIX DE L'APPROCHE RESEAU BAYESIENNE.....	91
3. CONVERTIR AdD A RB :.....	92
3.1. CONCERNANT LA PARTIE QUALITATIVE DU RB :.....	92
3.2. EN CE QUI CONCERNE LA PARTIE QUANTITATIVE (PROBABILITE) DU RB :.....	93
4. RB OBTENU A PARTIR DE AdD AVEC DES EVENEMENTS REPETES : .....	94
5. APPLICATION :.....	96
5.1. STRUCTURE DE RESEAU BAYESIEN : .....	96
5.2. PROBABILITE A POSTERIORI : .....	97
5.3. CALCULE DE FACTEUR D'IMPORTANCE DE BIRNBAUM :.....	98
5.4. CALCULE DE FACTEUR D'IMPORTANCE DE CRITICITE :.....	99
5.5. COMPARAISON DES RESULTATS : .....	99
6. CONCLUSION.....	100
<b>CONCLUSION GENERALE .....</b>	<b>101</b>
<b>BIBLIOGRAPHY .....</b>	<b>103</b>



## LISTE DES FIGURES

Figure 1 - Risque & Notions associées .....	6
Figure 2 - Exemple d'échelle d'intensité utilisé pour les études de danger.....	14
Figure 3 - Démarche pour l'élaboration d'un arbre des défaillances. Cette démarche est facilitée par l'application préalable d'une méthode du type APR, HAZOP ou AMDEC.....	23
Figure 4 - Exemple d'arbre des défaillances [17].....	24
Figure 5 - Réduction de l'arbre des défaillances pris en exemple [17] .....	26
Figure 6 - Règles générales de calcul des probabilités.....	28
Figure 7 - Un réseau bayésien montrant une version simplifiée d'un problème écologique réel.....	32
Figure 8 - Exemple d'un réseau Bayésien à deux variables .....	32
Figure 9 - Indépendance conditionnelle (connexion divergente).....	34
Figure 10 - Boucle dans un réseau bayésien [27] .....	35
Figure 11 - Apprentissage et inférence dans les réseaux Bayésiens.....	36
Figure 12 – Schéma général d'un établissement stockeur.....	44
Figure 13 - Silos verticaux en métal à fond conique.....	46
Figure 14 - Silos verticaux en béton.....	47
Figure 15 - Silos de stockage en métal à fond plat .....	48
Figure 16 - Silo de stockage de type "dôme" .....	49
Figure 17 - Schéma de convoyeur à chaîne .....	51
Figure 18 - Convoyeur à band .....	51
Figure 19 - Convoyeur à vis d'Archimède.....	52
Figure 20 – Schéma d'un élévateur à godets .....	53
Figure 21 - Schéma d'un nettoyeur à tamis cylindrique.....	56
Figure 22 - Schéma d'un nettoyeur circulaire.....	57
Figure 23 - Système de ventilation des silos .....	58
Figure 24 - Aspiration de poussières centralisée sur un convoyeur.....	59
Figure 25 - Schéma d'un séchoir à grain .....	61
Figure 26 - Les explosions de poussières dans l'industrie agroalimentaire (1977-2000) aux Etats-Unis.....	65
Figure 27 - Nombre d'accidents annuels impliquant des silos ayant générés une explosion .....	66
Figure 28 - Hexagone de l'explosion.....	71
Figure 29 - Les appareils où se produisent des explosions de poussières dans l'industrie agroalimentaire aux Etats-Unis.....	79
Figure 30 - Structure générale de l'ADD d'explosion d'élévateur à godet .....	83
Figure 31 - Sous-système (frottement mécanique).....	84
Figure 32 - Sous-système (apport de poussière en suspension).....	84
Figure 33 - Organigramme représentant un algorithme simplifié pour représenter un AdD en RB..	92
Figure 34 - Les événements de base C1, C2, B3 et C4 correspondent aux nœuds racines ; les portes H2 et H3 correspondent aux nœuds intermédiaires H2 et H3 et l'événement « FAULT » correspond au nœud de défaillance.....	93
Figure 35 - TPC correspondant à une porte ET. ....	93
Figure 36 - TPC correspondant à une porte OU. ....	93
Figure 37 - Exemple de AdD avec événements répétés.....	94
Figure 38 - RB correspondant à la Figure 37.....	94
Figure 39 - Exemple de AdD avec des branches répétées. ....	95
Figure 40 - Exemple de RB correspondant au AdD sur Figure 39.....	95
Figure 41 - Structure de réseau bayésienne d'explosion d'un élévateur à godet .....	96
Figure 42 - Probabilités postérieures des composants, étant donné que le système est défaillant.....	97

## LISTE DES TABLEAUX

<i>Tableau 1 - Recueil des plus graves accidents industriels survenus dans le monde entre 1960-2001 [8].....</i>	<i>5</i>
<i>Tableau 2 - Critères de choix pour les principales méthodes d'analyse des risques .....</i>	<i>13</i>
<i>Tableau 3 - Exemple d'échelle de cotation en probabilité .....</i>	<i>14</i>
<i>Tableau 4 - Exemple de grille de criticité .....</i>	<i>15</i>
<i>Tableau 5 - Syntaxes des arbres de défaillance .....</i>	<i>22</i>
<i>Tableau 6 Principales règles de l'algèbre de BOOLE .....</i>	<i>25</i>
<i>Tableau 7 - Les appareils où se produisent des explosions dans l'industrie l'agro-alimentaire 1990-1999 .....</i>	<i>79</i>
<i>Tableau 8 - Résultat obtenue du retour d'expérience des accidents des silos agro-alimentaire.....</i>	<i>81</i>
<i>Tableau 9 - Liste des événements de base utilisés dans ADD.....</i>	<i>84</i>
<i>Tableau 10 - liste des ordres des coupes minimales existant dans ADD .....</i>	<i>86</i>
<i>Tableau 11 - Les coupes minimales.....</i>	<i>87</i>
<i>Tableau 12 - Liste des facteurs d'importances.....</i>	<i>88</i>
<i>Tableau 13 - Calcule de Facteur d'importance de Birnbaum. ....</i>	<i>98</i>
<i>Tableau 14 - Calcul du Facteur d'importance de Criticité.....</i>	<i>99</i>
<i>Tableau 15 - Comparaison entre les valeurs de la mesure de probabilité postérieure et de criticité des composants. ....</i>	<i>99</i>
<i>Tableau 16 - Résumé des résultats de comparaison entre ADD et RB. ....</i>	<i>100</i>

## LISTE DES ABREVIATIONS

CEI : commission électrotechnique internationale

ISO : Organisation internationale de normalisation (International Organisation for Standardisation)

ADD : arbre de défaillance

ES : évènement sommet

ER : évènement redouté

EB : évènement de base

RB : réseaux bayésiens

APR : Analyses préliminaire des risques

AMDEC : Analyse des Mode de Défaillance, de leurs Effets et leur criticité.

HAZOP : Analyse de risque et de sureté de fonctionnement (HAZard and OPerability analyses)

FIP : Facteurs d'importance probabilistes

MIF : Facteur d'Importance Marginale

CIF : Facteur d'Importance Critique

DIF : Facteur d'Importance de Diagnostic

RIF : Facteur d'Augmentation du Risque (RAW) ;

RDF : Facteur de Diminution du Risque (RRW).

INRS : l'Institut national de Recherche et de Sécurité

REX : Retour d'expérience

Base ARIA : Analyse, recherche et information sur les accidents

BARPI : Bureau d'Analyse des Risques et Pollution Industriels

CM : Coupe minimale

OHSAS : Occupational Health and Safety Assessment Series (Série sur l'évaluation de la santé et de la sécurité au travail)

## INTRODUCTION GENERALE

Dans la plupart des pays, les céréales constituent la base de l'alimentation humaine et animale. Souvent moulus sous forme de farine raffinée ou plus ou moins complète, mais aussi en grains. Une part de ces productions vivrières doit être stockée dans des silos. On trouve notamment ce type d'installations dans les malteries, sucreries, huileries, minoteries, Les matières stockées ou mises en œuvre sont principalement des céréales, des oléagineux, des légumineuses et des produits de transformation tels que le sucre, les tourteaux, granulés et farines.

Le terme "silo" utilisé dans ce cas-là est pris dans son signification la plus générale recouvrant les cellules, les boisseaux, les dispositifs de transport (élévateurs, transporteurs à chaîne, bandes transporteuses...), et les équipements connexes comme les séchoirs, Alors Nous avons essayé d'analyser tous les risques concernant ces équipements, [1]

Comme toute installation, les silos présentent des différents risques d'accidents pouvant provoquer des catastrophes, risque d'explosion en particulier, représente des accidents graves et parfois mortels se produisent chaque année au cours des opérations habituellement réalisées dans les silos depuis la réception jusqu'à l'expédition.

Malgré l'existence de mesures de prévention et de protection efficace, les explosions surviennent fréquemment dans les stockages de produits agroalimentaires, et l'un des catastrophes le plus connus l'explosion des silos à grains d'un ensemble de stockage portuaire à Blaye. En Gironde, en 1997, est un exemple du cumul de facteurs de gravité qui a provoqué la mort de 11 personnes. [2]

L'analyse des risques vise à identifier les sources de danger et les situations associés qui peuvent conduire qui peuvent conduire à des scénarios catastrophiques, il existe plusieurs méthodes pour une analyse quantitative, parmi lesquelles : Arbre de défaillance (ADD), l'une des meilleures méthodes quantitatives utilisées, ainsi que les réseaux bayésiens (RB).

C'est dans ce cadre que s'inscrit notre projet de fin d'étude. Il s'agit en effet de faire une analyse approfondie pour identifier toutes les causes pouvant conduire à l'explosion des silos agroalimentaires utilisant la méthode arbre de défaillance et le RB, en s'appuyant sur le retour d'expérience.

Dans ce contexte, le présent mémoire est divisé en deux parties, chaque partie comporte deux chapitres :

Une partie théorique :

Chapitre I : ce chapitre présente des descriptions générales sur la démarche pour l'analyse de risque, description de quelques méthodes d'analyse de risque ainsi que les limites et les avantages de chacune des méthodes

Chapitre II : a pour objectifs de présenter la réglementation algérienne et étrangère appliqués aux silos à grain, ainsi qu'une description générale d'équipements de silo à grain et principe de son fonctionnement.

Une partie pratique :

Chapitre I : Le premier chapitre est dédié à la construction de l'arbre de défaillance pour analyser le scénario qu'on a le choisi « explosion d'élévateur à godet », on utilise logiciel « Arbre analyste » pour déterminer la probabilité d'occurrence de l'événement redouté, en outre afin de déterminer les facteurs d'importance et les coupes minimales.

Chapitre II : Le deuxième chapitre consacré pour la transformation de l'arbre de défaillance en réseau bayésien suivant une algorithmes, calcul la probabilité à a posteriori et les facteurs d'importance en fonction de l'inférence bayésienne, et ces calculs fait par un logiciel qui s'appelle « MSBNx », en outre on compare les résultats obtenus avec que celles obtenues par l'ADD.

# **CHAPITRE I : Démarche et méthodes d'analyse des risques.**

## 1. INTRODUCTION

L'analyse de risque constitue une démarche d'identification et de réduction des risques réalisés sous la responsabilité de l'exploitant, elle décrit les scénarios qui conduisent phénomènes dangereux et accidents potentiels.

C'est dans ce cadre que ce chapitre est consacré, il présente la démarche d'analyse des risques, description générale des méthodes les plus utilisées pour réaliser cette démarche, ainsi que les critères de choix de méthode et les limites et les avantages de chacune d'elles.

## 2. NOTION ET CONCEPTS

### 2.1. NOTION DE DANGER

Selon Desroches [3] et la norme IEC 61508 [4], le danger désigne une nuisance potentielle pouvant porter atteinte aux personnes, aux biens (détérioration ou destruction) ou à l'environnement. Les dangers peuvent avoir une incidence directe sur les personnes, par des blessures physiques ou des troubles de la santé, ou indirecte, au travers de dégâts subis par les biens ou l'environnement.

Le référentiel OHSAS 18001 [5] définit le danger comme étant une source ou une situation pouvant nuire par blessure ou atteinte à la santé, dommage à la propriété et à l'environnement du lieu de travail ou une combinaison de ces éléments.

### 2.2. NOTION DE RISQUE

La perception des dommages potentiels liés à une situation dangereuse se rapporte à la notion de risque. Le terme risque a plusieurs significations. De même, les risques peuvent être de nature très variée et beaucoup de classifications ont été proposées.

Les définitions du risque à deux dimensions sont assez proches. Selon Villemeur [6], le risque est une mesure d'un danger associant une mesure de l'occurrence d'un événement indésirable et une mesure de ses effets ou conséquences.

Et selon OHSAS 18001 [5], un risque est la combinaison de la probabilité et de la (des) conséquence (s) de la survenue.

Qualitativement, le risque se caractérise par :

- L'ampleur des dommages, suite à un événement redouté, selon un critère de gravité (critique, marginal, mineur, insignifiant, etc.). Ce critère tient compte de l'appréciation des conséquences en termes de pertes humaines (blessures, mort) ou en termes de pertes économiques (coûts liés aux dégradations, etc.) ;
- Le caractère incertain lié à l'apparition d'un événement redouté (fréquent, rare, improbable, etc.) provoquant le dommage à partir d'une situation dangereuse déterminée.

### 2.3. SITUATION DANGEREUSE :

La situation dangereuse ou le scénario de risque est ainsi déterminé comme la combinaison entre un élément dangereux et un processus de contact, combinaison qui peut être à l'origine d'accident et donc de dommage : Électrocution, Coupure, Écrasement, Irritation... [7]

### 2.4. NOTION D'ACCIDENT

Selon OHSAS 18001 [5], l'accident est un événement imprévu entraînant la mort, une détérioration de la santé, des lésions, des dommages ou autres pertes.

Le Tableau 1 présente un recueil des plus importants accidents industriels survenus dans le monde entre 1960 et 2001.

Accident	Type d'accident	Victimes et dégâts
Feyzin - France (1966)	Incendie d'une industrie de stockage pétrochimique	18 morts
Flixborough - Grande Bretagne (1974)	Explosion sur un site industriel	28 morts
Seveso - Italie (1976)	Fuite de dioxine d'une usine chimique	37000 personnes touchées
Bhopal - Inde (1984)	Fuite d'un gaz toxique	2 500 morts et 250 000 blessés
Mexico - Mexique (1984)	Explosion d'une citerne de pétrole liquéfié	500 morts et 7 000 blessés
Tchernobyl - Ukraine (1986)	Explosion d'une centrale nucléaire	Plus de 15 000 morts
La Mède - France (1992)	Explosion dans une raffinerie	6 morts et 7 blessés
Toulouse - France (2001)	Explosion d'un site industriel	30 morts et plus de 2 000 blessés

*Tableau 1 - Recueil des plus graves accidents industriels survenus dans le monde entre 1960-2001 [8]*

L'ampleur et la fréquence de ces accidents ont suscité de nombreux efforts sur les études de risques afin de mieux les prévenir, les prévoir et les gérer.



## 2.5. NOTION DE DOMMAGE :

Le dictionnaire Larousse définit le dommage comme « Préjudice ou dégât causé à quelqu'un, à quelque chose ». [9]

Le dommage est un préjudice causé par un système à son environnement passif conduisant à une diminution de l'intégrité physique des personnes ou de la valeur initiale des biens ou des équipements.

ISO dans sa la série de norme 14000 définit le dommage comme suit : « Blessure physique ou une atteinte à la santé des personnes ou dégât causé aux biens ou à l'environnement ». [10]

Toutes les notions précédentes en relation se présentent dans Figure 1:

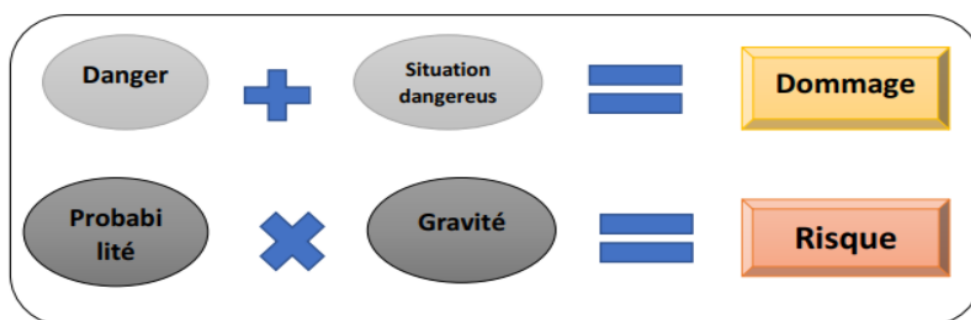


Figure 1 - Risque & Notions associées

## 2.6. NOTION DE SECURITE

La sécurité est souvent définie par rapport à son contraire : elle serait l'absence de danger, d'accident ou de sinistre.

Selon [11], la sécurité concerne la non occurrence d'événements pouvant diminuer ou porter atteinte à l'intégrité du système, pendant toute la durée de l'activité du système, que celle-ci soit réussie, dégradée ou ait échoué.

Et suivant le guide ISO/CEI 73 [12] élaboré par l'ISO sur la terminologie du management du risque, la sécurité est l'absence de risque inacceptable, de blessure ou d'atteinte à la santé des personnes, directement ou indirectement, résultant d'un dommage au matériel ou à l'environnement.

### 3. PRINCIPES POUR LA GESTION DES RISQUES

La gestion des risques ou management des risques peut être définie comme l'ensemble des activités coordonnées menées en vue de réduire les risques à un niveau jugé tolérable ou acceptable à un moment donné et dans un contexte donné. Il existe actuellement plusieurs référentiels définissant le vocabulaire du management des risques qui présentent encore entre eux des différences relativement importantes sur les termes. Cependant, au-delà des mots, il est important de souligner que tous ces documents décrivent un processus de gestion identique dans son essence. Au sein de ce processus, l'analyse de risques occupe une place centrale, même si elle n'est pas toujours nommée explicitement.

#### 3.1. ANALYSE DES RISQUES

L'analyse des risques vise donc tout d'abord à identifier les sources de dangers et les situations associées qui peuvent conduire à des dommages sur les personnes, l'environnement ou les biens.

Suivant les outils ou méthodes employés, la description des situations dangereuses est plus ou moins approfondie et peut conduire à l'élaboration de véritables scénarios d'accident.

L'analyse des risques permet aussi de mettre en lumière les barrières de sécurité existantes en vue de prévenir l'apparition d'une situation dangereuse (barrières de Prévention) y d'en limiter les conséquences (barrières de protection).

Consécutivement à cette identification, il s'agit d'estimer les risques en vue de hiérarchiser les risques identifiés au cours de l'analyse et de pouvoir comparer ultérieurement ce niveau de risque aux critères de décision.

#### **L'estimation du risque implique la détermination :**

- D'un niveau de probabilité que le dommage survienne,
- D'un niveau de gravité de ce dommage.

L'estimation de ces grandeurs peut être qualitative, quantitative ou semi-quantitative, suivant le contexte, les exigences des décideurs et les outils et données disponibles.

Les outils d'analyse de risque présentés dans la suite de ce document permettent une approche plus ou moins détaillée de la probabilité. Parmi ceux-là, les arbres de défaillance et d'événement sont les outils le plus adaptés aux calculs probabilistes.

### 3.2. EVALUATION DU RISQUE

Dans les diverses normes présentées plus haut, l'évaluation du risque désigne l'étape de comparaison du risque estimé à des critères de décision face au risque. La plupart du temps, il s'agit de décider si le risque est acceptable ou s'il doit faire l'objet de mesures supplémentaires de maîtrise. La définition de critères d'acceptabilité du risque est réalisée en amont ou en parallèle au processus d'analyse de risque.

A ce propos, la définition du risque tolérable donnée dans le guide ISO/CEI 51 :1999 [13] laisse transparaître la difficulté de retenir des critères objectifs et forfaitaires pour l'acceptation du risque.

### 3.3. CLASSIFICATION DES RISQUES :

Dans la littérature, on trouve plusieurs classifications des risques. Selon Tanzi [14], l'analyse des risques permet de les classer en cinq grandes familles :

- Les risques naturels : inondation, feu de forêt, avalanche, tempête, séisme, etc.
- Les risques technologiques : d'origine anthropique, ils regroupent les risques industriels, nucléaires, biologiques, ruptures de barrage, etc.,
- Les risques de transports collectifs : (personnes, matières dangereuses) sont aussi considérés comme des risques technologiques ;
- Les risques de la vie quotidienne : accidents domestiques, accidents de la route, etc.
- Les risques liés aux conflits.

Une des classifications les plus répandues est de classer les risques en deux catégories :

Les risques naturels et les risques liés à l'activité humaine.

Les risques liés à l'activité humaine recouvrent un ensemble de catégories de risques divers :

- Les risques techniques, technologiques, industriels et nucléaires ;

- Les risques liés aux transports ;
- Les risques sanitaires ;
- Les risques économiques, financiers, managériaux ;
- Les risques médiatiques ;
- Les risques professionnels.

### **3.4. REDUCTION DU RISQUE**

La réduction du risque (ou maîtrise du risque) désigne l'ensemble des actions ou dispositions entreprises en vue de diminuer la probabilité ou la gravité des dommages associés à un risque particulier.

De telles mesures doivent être envisagées dès lors que le risque considéré est jugé inacceptable.

De manière très générale, les mesures de maîtrise du risque se répartissent en [15]:

- Mesures (ou barrières) de prévention : mesures visant à éviter ou limiter la probabilité d'un événement indésirable, en amont du phénomène dangereux.
- Mesures (ou barrières) de limitation : mesures visant à limiter l'intensité des effets d'un phénomène dangereux.
- Mesures (ou barrières) de protection : mesure visant à limiter les conséquences sur les cibles potentielles par diminution de la vulnérabilité.

### **4. DEMARCHE POUR L'ANALYSE DES RISQUES ASSOCIES A DES INSTALLATIONS INDUSTRIELLES**

Les paragraphes suivants présentent la démarche adoptée pour l'analyse des risques associés à l'exploitation d'installations industrielles. Cette démarche se décompose généralement en plusieurs étapes [16]:

- Définition du système à étudier et des objectifs à atteindre.
- Recueil des informations indispensables à l'analyse des risques.
- Définition de la démarche à adopter
- Mise en œuvre de l'analyse de risques

### **4.1. DEFINITION DU SYSTEME ET DES OBJECTIFS A ATTEINDRE**

#### **4.1.1. DEFINITION DU SYSTEME**

L'analyse des risques est un travail qui peut s'avérer complexe et mobiliser des ressources importantes. Dès lors, il est indispensable d'identifier clairement le système à étudier et de déterminer sans ambiguïtés les limites de l'étude.

Cette définition permet notamment de limiter la description du système aux informations nécessaires et suffisantes au champ de l'étude. [16]

#### **4.1.2. DEFINITION DES OBJECTIFS A ATTEINDRE**

La définition des objectifs de l'analyse des risques est une étape essentielle qui permet notamment de définir les critères d'acceptabilité des risques.

Selon les objectifs poursuivis, la démarche et les outils utilisés pourront être significativement différents.

### **4.2. RECUEIL DES INFORMATIONS INDISPENSABLES A L'ANALYSE DES RISQUES**

Le recueil des informations nécessaires à l'analyse des risques est probablement une des phases les plus longues du processus mais également une des plus importantes.

Avant de mettre en œuvre la démarche d'analyse des risques, il est généralement nécessaire de respecter les étapes suivantes [16] :

- Description fonctionnelle et technique du système,
- Description de son environnement,
- Identification des potentiels de dangers internes et externes,
- Analyse des incidents/accidents passés.

#### **4.2.1. DESCRIPTION FONCTIONNELLE ET TECHNIQUE DU SYSTEME**

La description fonctionnelle vise notamment à collecter l'ensemble des informations indispensables pour mener l'analyse. De manière très générale, il s'agit de traiter les points suivants :

- Identifier les fonctions du système étudié,
- Caractériser la structure du système,
- Définir les conditions de fonctionnement du système,
- Décrire les conditions d'exploitation du système.

### 4.2.2. ENVIRONNEMENT DU SYSTEME

La description de l'environnement du système est importante à double titre :

- L'environnement peut être une source d'agressions pour le système,
- L'environnement constitue généralement un ensemble d'éléments vulnérables pouvant être affectés en cas d'accident.

### 4.2.3. IDENTIFICATION DES POTENTIELS DE DANGERS

#### 4.2.3.1. POTENTIELS DE DANGERS INTERNES

La définition des potentiels de dangers internes doit être réalisée de la façon la plus exhaustive possible en étudiant entre autres :

- Les dangers liés aux produits (ou, plus exactement, les substances et préparations).
- Les conditions opératoires.
- Les réactions chimiques.

#### 4.2.3.2. POTENTIELS DE DANGERS EXTERNES

L'identification des potentiels de dangers externes doit permettre de caractériser les risques d'agressions externes sur le système.

Si parfois un examen rapide de ces potentiels de dangers externes apporte des éléments de réponse satisfaisants, dans d'autres cas, il est nécessaire de mettre en œuvre des outils spécifiques. Cela peut notamment être le cas pour :

- Les risques d'agressions sismiques,
- Les risques d'inondation,
- Les risques liés à la foudre,
- Les synergies d'accidents ou effets dominos.

### 4.2.4. ANALYSE DES INCIDENTS/ACCIDENTS PASSES

L'analyse des accidents passés joue un rôle fondamental dans l'analyse des risques à de nombreux titres :

- Elle permet d'identifier a priori les incidents ou accidents susceptibles de se produire à partir :
  - Des accidents ou incidents s'étant déjà produits sur le site étudié,

- Des accidents survenus sur des installations comparables à celles étudiées.
- Elle met en lumière les causes les plus fréquentes.
- Elle constitue une base de travail pertinente pour l'analyse des risques.

### **4.3. DEFINITION DE LA DEMARCHE A METTRE EN OEUVRE**

La définition précise de la démarche d'analyse des risques à mettre en œuvre demande notamment de choisir le ou les outils les mieux adaptés, et de fixer des échelles de cotation des risques et une grille de criticité. [16]

#### **4.3.1. CHOIX DES METHODES D'ANALYSE DES RISQUES**

Il existe un grand nombre d'outils ou méthodes dédiés à l'identification des dangers et des risques associés à un procédé ou une installation. En 1990, M. Monteau et M. Favaro en avaient identifié une quinzaine particulièrement adaptée à l'analyse des risques professionnels. Tixier et al. En ont recensé 67 en 2002 en étendant le champ de l'analyse de risques à différentes situations et types de dangers.

Quelques-unes des méthodes les plus fréquemment utilisées sont :

- L'Analyse Préliminaire des Risques (APR),
- L'Analyse des Modes de Défaillances, de leurs Effets et de leur Criticité (AMDEC),
- L'Analyse des risques sur schémas type HAZOP,
- La méthode « What-if ? » qui est une adaptation de la méthode HAZOP.
- L'Analyse par arbre des défaillances,
- L'Analyse par arbre d'évènements,
- L'Analyse par Noeud Papillon.

D'une manière générale, le choix de retenir une méthode particulière d'analyse des risques s'effectue à partir de son domaine d'application et de ses caractéristiques.

#### **4.3.2. DOMAINES D'APPLICATION**

Les outils d'analyse des risques doivent être choisis en fonction des caractéristiques des installations à étudier et du niveau de détail recherche.

En définitive, il n'y a pas de « bonne » ou « mauvaise » méthode d'analyse des risques. Ces méthodes ne sont que des aides guidant la réflexion et il convient donc de retenir celles qui sont les mieux adaptées aux cas à traiter.

Méthodes	Approche	Défaillances envisagées	Niveau de détail	Domaines d'application privilégiés
APR	Inductive	Indépendantes	+	Installation les moins complexes Etape préliminaire d'analyse
HAZOP	Inductive	Indépendantes	++	Systèmes thermo-hydraulique
What-if	Inductive	Indépendantes	++	Systèmes thermo-hydraulique
AMDEC	Inductive	Indépendantes	++	Sous-ensembles techniques bien délimités
Arbre d'évènements	Inductive	Combinées	+++	Défaillances préalablement identifiées
Arbre des défaillances	Déductive	Combinées	+++	Evènements redoutés ou indésirables préalablement identifiées
Nœud papillon	Inductive Déductive	Combinées	+++	Scénarios d'accidents jugés les plus critiques

Tableau 2 - Critères de choix pour les principales méthodes d'analyse des risques

### 4.3.3. ECHELLES DE COTATION DES RISQUES

Dans ces cas, il faut définir en amont de l'analyse des échelles de cotation des risques en termes de probabilité et de gravité ainsi qu'une grille de criticité explicitant les critères d'acceptabilité sur lesquels le groupe de travail se fondera pour proposer des mesures de maîtrise supplémentaires.

#### 4.3.3.1. ECHELLES DE PROBABILITE, D'INTENSITE ET DE GRAVITE

Les échelles de probabilité, de gravité et/ou d'intensité, utilisées pour une évaluation quantitative simplifiée des risques doivent être adaptées à l'installation étudiée. A cet égard, les exploitants possédant la meilleure connaissance de leurs installations. En particulier, lorsque les résultats de l'analyse de risque sont destinés à être utilisés dans un cadre réglementaire, comme c'est le cas pour l'étude de dangers, il est essentiel de s'assurer de la compatibilité des échelles utilisées avec celles définies dans les textes.

Les tableaux suivants présentent des exemples d'échelles de cotation en probabilité, intensité et gravité que l'INERIS peut utiliser pour l'analyse des risques d'accidents majeurs dans le cadre de l'étude des dangers.



qualitative :		"Evènement extrêmement probable"	"Evènement très improbable"	"Evènement improbable"	"Evènement probable"	"Evènement courant"	
semi-quantitative CLASSE PROBABILITE (de 0 à 6)	6	$10^6$	$10^5$	$10^4$	$10^3$	$10^2$	$10^1$
		5	4	3	2	1	0

Tableau 3 - Exemple d'échelle de cotation en probabilité

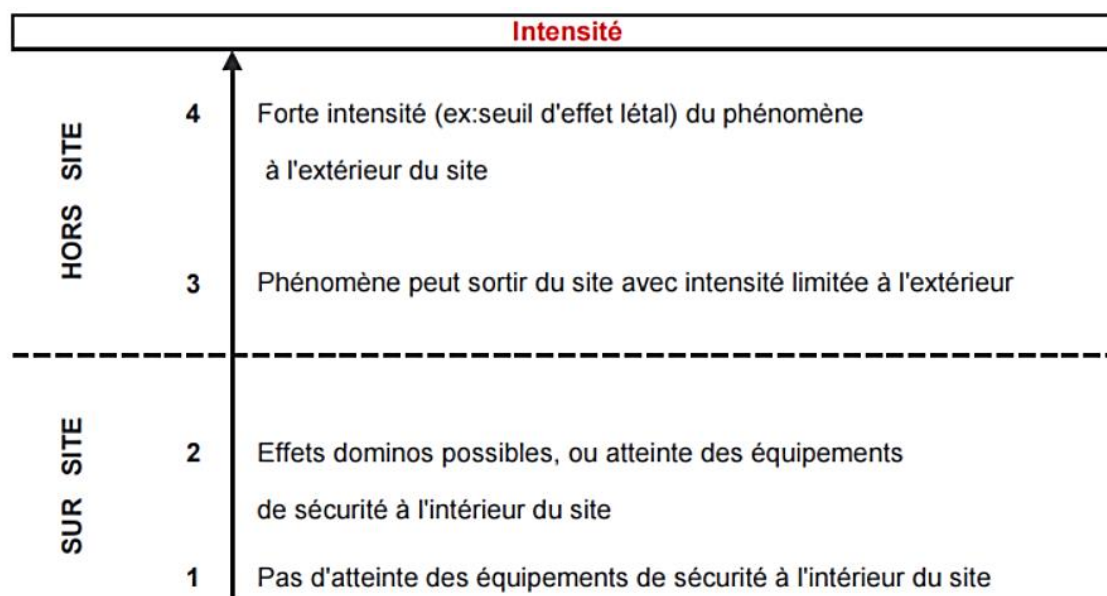


Figure 2 - Exemple d'échelle d'intensité utilisé pour les études de danger

- Les seuils des effets irréversibles (SEI) délimitent la « zone des dangers significatifs pour la vie humaine ».
- Les seuils des effets létaux (SEL) correspondant à une CL 1 % délimitent la « zone des dangers graves pour la vie humaine ».
- Les seuils des effets létaux significatifs (SELS) correspondant à une CL 5 % délimitent la « zone des dangers très graves pour la vie humaine »,

L'échelle de gravité présentée en Tableau 3 ne considère que les dommages causés aux personnes à l'extérieur de l'établissement. Suivant le contexte, il est pertinent de considérer des échelles du même type pour les dommages causés à l'environnement ou aux travailleurs de l'établissement.

#### 4.3.3.2. GRILLE DE CRITICITE

La grille de criticité permet au groupe de travail de définir les couples (Probabilité ; Gravité) ou (Probabilité, Intensité) correspondant à des risques jugés inacceptables ou devant faire l'objet d'action de maîtrise des risques de façon prioritaire.

Le Tableau 4 présente un exemple de grille de criticité générique classique. Les échelles d'intensité et de probabilité utilisées sont celles présentées en Tableau 3 et Figure 2.

Dans cette grille, le domaine gris foncé désigne les couples (intensité : probabilité) des scénarios d'accidents qui sont considérés comme inacceptables.

Le domaine gris clair représente les risques jugés critiques pour lesquels les mesures de sécurité mises en place ont été jugées suffisantes en regard des risques.

Dans le cadre de la maîtrise des accidents majeurs, cela passe notamment par des actions humaines et l'identification d'éléments Importants Pour la Sécurité (IPS).

<b>Niveau d'intensité</b>					
4					
3					
2					
1					
	6	5	4	3	<b>Niveau de probabilité</b>

	Risques jugés inacceptables
	Risques critiques

Tableau 4 - Exemple de grille de criticité

## 5. LES METHODES CLASSIQUES D'ANALYSE DES RISQUES

Les principales méthodes d'analyse des risques d'accidents sont :

- L'Analyse Préliminaire des Risques (APR).
- L'Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité (AMDEC),
- L'Analyse des risques sur schémas type HAZOP,
- La méthode «What if ? »,
- L'Analyse par arbres des défaillances,
- L'Analyse par arbres d'événements,
- L'Analyse par Noeud Papillon

La description des outils présentés dans ce chapitre à été réalisée notamment à partir des ouvrages suivants :

Sureté de Fonctionnement des systèmes industriels

A. VILLEMEUR, Collection de la Direction des Etudes et Recherches  
D'électricité de France, n°67, Ed. Eyrolles, 1988 [17]

Cahiers de sécurité n°13 :

Sécurité des Installations - méthodologie de l'analyse des risques Union des  
Industries Chimiques,

Document Technique DT 54, Mars 1998 [18]

Guidelines for Hazard Evaluation Procedures,

Center for Chemical Process Safety, American Institute of Chemical Engineers,  
(AIChE), 1992 [19]

Norme CEI 60812 : 1985 :

« Techniques d'Analyse de la Fiabilité des Systèmes Procédure d'Analyse des  
Modes de Défaillances et de leurs Effets (AMDE) » [20]

Norme CEI 61882 : 2001

« Etudes de danger et d'exploitabilité (études HAZOP) - Guide d'application » [21]

### **5.1. ANALYSE PRELIMINAIRE DES RISQUES (APR)**

#### **5.1.1. HISTORIQUE ET DOMAINE D'APPLICATION**

L'Analyse Préliminaires des Risques (Dangers) a été développée au début des années 1960 dans les domaines aéronautiques et militaires. L'Union des Industries Chimiques (UIC) recommande son utilisation en France depuis le début des années 1980 [18], l'Analyse Préliminaire des Risques (APR) est une méthode d'usage très général couramment utilisée pour l'identification des risques au stade préliminaire de la conception d'une installation ou d'un projet.

#### **5.1.2. PRINCIPE [16]**

L'Analyse Préliminaire des Risques nécessite dans un premier temps d'identifier les éléments dangereux de l'installation. Ces éléments dangereux désignent le plus souvent :

- Des substances ou préparations dangereuses.
- Des équipements dangereux.
- Des opérations dangereuses associées au procédé.

L'identification de ces éléments dangereux est fonction du type d'installation étudiée. L'APR peut être mise en œuvre sans ou avec l'aide de liste de risques types ou en appliquant les mots guides HAZOP (dérives de paramètres de fonctionnement).

Il est également à noter que l'identification de ces éléments se fonde sur la description fonctionnelle réalisée avant la mise en œuvre de la méthode.

A partir de ces éléments dangereux, l'APR vise à identifier, pour un élément dangereux, une ou plusieurs situations de danger.

Le groupe de travail doit alors déterminer les causes et les conséquences de chacune des situations de danger identifiées puis identifier les sécurités existantes sur le système étudié. Si ces dernières sont jugées insuffisantes vis-à-vis du niveau de risque identifié dans la grille de criticité, des propositions d'amélioration doivent alors être envisagées.

### **5.1.3. LIMITES ET AVANTAGES**

Le principal avantage de l'Analyse Préliminaire des Risques est de permettre un examen relativement rapide des situations dangereuses sur des installations.

En revanche, l'APR ne permet pas de caractériser finement l'enchaînement des événements susceptibles de conduire à un accident majeur pour des systèmes complexes.

Elle permet ainsi de mettre en lumière les équipements ou installations qui peuvent nécessiter une étude plus fine menée grâce à des outils tels que l'AMDEC, l'HAZOP ou l'analyse par arbre des défaillances.

## **5.2. AMDE ET AMDEC**

### **5.2.1. HISTORIQUE ET DOMAINE D'APPLICATION**

L'Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets (AMDE) a été employée pour la première fois dans le domaine de l'industrie aéronautique durant les années 1960.

Son utilisation s'est depuis largement répandue à d'autres secteurs d'activités tels que l'industrie chimique, pétrolière ou le nucléaire.

De fait, elle est essentiellement adaptée à l'étude des défaillances de matériaux et d'équipements et peut s'appliquer aussi bien à des systèmes de technologies différentes

(systèmes électriques, mécaniques, hydrauliques...) qu'à des systèmes alliant plusieurs techniques.

### 5.2.2. PRINCIPE

L'Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets repose notamment sur les concepts de :

- Défaillance, soit la cessation de l'aptitude d'un élément ou d'un système à accomplir une fonction requise,
- Mode de défaillance, soit l'effet par lequel une défaillance est observée sur un élément du système,
- Cause de défaillance, soit les événements qui conduisent aux modes de défaillances,
- Effet d'un mode de défaillance, soit les conséquences associées à la perte de l'aptitude d'un élément à remplir une fonction requise.

### 5.2.3. LIMITES ET AVANTAGES

L'AMDEC s'avère très efficace lorsqu'elle est mise en œuvre pour l'analyse de défaillances simples d'éléments conduisant à la défaillance globale du système. De par son caractère systématique et sa maille d'étude généralement fine, elle constitue un outil précieux pour l'identification de défaillances potentielles et les moyens d'en limiter les effets ou d'en prévenir l'occurrence.

Dans le cas de systèmes particulièrement complexes comptant un grand nombre de composants, l'AMDEC peut être très difficile à mener et particulièrement fastidieuse compte tenu du volume important d'informations à traiter. Cette difficulté est décuplée lorsque le système considéré comporte de nombreux états de fonctionnement.

Par ailleurs, l'AMDEC considère des défaillances simples et peut être utilement complétée, selon les besoins de l'analyse, par des méthodes dédiées à l'étude de défaillances multiples comme l'analyse par arbre des défaillances par exemple.

## 5.3. HAZOP

### 5.3.1. HISTORIQUE ET DOMAINE D'APPLICATION

La méthode HAZOP, pour HAZard OPERability, a été développée par la société Impérial Chemical Industries (ICI) au début des années 1970. Elle a depuis été adaptée

dans différents secteurs d'activité utilisant des systèmes thermo-hydrauliques (chimie, pétrochimie...). L'Union des Industries Chimiques (UIC) a publié en 1980 une version française de cette méthode dans son cahier de sécurité n°2 intitulé « Etude de sécurité sur schéma de circulation des fluides » [22]

Considérant de manière systématique les dérives des paramètres d'une installation en vue d'en identifier les causes et les conséquences, cette méthode est particulièrement utile pour l'examen de systèmes thermo-hydrauliques, pour lesquels des paramètres comme le débit, la température, la pression, le niveau, la concentration... sont particulièrement importants pour la sécurité de l'installation.

De par sa nature, cette méthode requiert notamment l'examen de schémas et plans de circulation des fluides ou schémas P&ID (Piping and Instrumentation Diagram)

### 5.3.2. PRINCIPE

L'HAZOP suit une procédure assez semblable à celle proposée par l'AMDE.

L'HAZOP ne considère plus des modes de défaillances mais les dérives potentielles (ou déviations) des principaux paramètres liés à l'exploitation de l'installation.

Pour chaque partie constitutive du système examiné (ligne ou maille), la génération (conceptuelle) des dérives est effectuée de manière systématique par la conjonction :

- De mots-clés comme par exemple « Pas de », « Plus de », « Moins de », « Trop de »
- Des paramètres associés au système étudié. Des paramètres couramment rencontrés sont la température, la pression, le débit, la concentration, mais également le temps ou des opérations à effectuer.

**Mot-clé + Paramètre = Dérive**

Néanmoins, dans le domaine des risques accidentels majeurs, une estimation a priori de la probabilité et de la gravité des conséquences des dérives identifiées s'avère souvent nécessaire. Dans ce contexte, l'HAZOP doit donc être complétée par une analyse de la criticité des risques sur les bases d'une technique quantitative simplifiée.

Cette adaptation semi-quantitative de l'HAZOP est d'ailleurs mentionnée dans la norme CEI :61882 « Etudes de danger et d'exploitabilité (études HAZOP) – Guide d'application » [21]

### 5.3.3. LIMITES ET AVANTAGES

L'HAZOP est un outil particulièrement efficace pour les systèmes thermo-hydrauliques. Cette méthode présente tout comme l'AMDE un caractère systématique et méthodique. Considérant, de plus, simplement les dérives de paramètres de fonctionnement du système, elle évite entre autres de considérer, à l'instar de l'AMDE, tous les modes de défaillances possibles pour chacun des composants du système.

En revanche, l'HAZOP ne permet pas dans sa version classique d'analyser les évènements résultant de la combinaison simultanée de plusieurs défaillances.

Enfin, L'HAZOP traitant de tous types de risques, elle peut être particulièrement longue à mettre en œuvre et conduire à une production abondante d'information ne concernant pas des scénarios d'accidents majeurs.

## 5.4. ARBRE DES DEFAILLANCES

### 5.4.1. HISTORIQUE ET DOMAINE D'APPLICATION

L'ADD ou en anglais (Fault tree Analysis FTA) est l'une des techniques connues par leurs utilisations dans l'analyse de la sécurité et de la fiabilité des processus. Appelée aussi l'arbre des causes ou l'arbre des fautes a été élaboré au début des années 1960 par la compagnie « Bell téléphone ». Cette méthode déductive permet de combiner les composants par identification des causes relatives aux événements redoutés et des fonctions d'un système. [23]

Visant à déterminer l'enchaînement et les combinaisons d'évènements pouvant conduire à un événement redouté pris comme référence, l'analyse par arbre des défaillances est maintenant appliquée dans de nombreux domaines tels que l'aéronautique, le nucléaire, l'industrie chimique...

Elle est également utilisée pour analyser a posteriori les causes d'accidents qui se sont produits. Dans ces cas, l'événement redouté final est généralement connu car observé. On parle alors d'analyse par arbre des causes, l'objectif principal étant de déterminer les causes réelles qui ont conduit à l'accident.

### 5.4.2. PRINCIPE

L'analyse par arbre de défaillances est une méthode de type déductif. En effet, il s'agit, à partir d'un événement redouté défini a priori, de déterminer les enchaînements d'évènements ou combinaisons d'évènements pouvant finalement conduire à cet événement. Cette analyse permet de remonter de causes en causes jusqu'aux évènements de base susceptibles d'être à l'origine de l'évènement redouté.

Les évènements de base correspondent généralement à des :

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

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

- Ces évènements sont indépendants ;
- Ils ne seront pas décomposés en éléments plus simples faute de renseignements, d'intérêt ou bien parce que cela est impossible ;
- Leur fréquence ou leur probabilité d'occurrence peut être estimée.

Ainsi, l'analyse par arbre des défaillances permet d'identifier les successions et les combinaisons d'évènements qui conduisent des évènements de base jusqu'à l'évènement indésirable retenu.

Les liens entre les différents évènements identifiés sont réalisés grâce à des portes logiques (de type « ET » et « OU » par exemple). Cette méthode utilise une symbolique graphique particulière qui permet de présenter les résultats dans une structure arborescente.

Le lecteur peut, par exemple se reporter aux conventions de présentation proposées dans la norme CEI 61025 :1990 « Analyse par Arbre de Panne (APP) ». [24]



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

L'analyse par arbre des défaillances d'un événement redouté peut se décomposer en trois étapes successives :

- Définition de l'événement redouté étudié,
- Élaboration de l'arbre,
- Exploitation de l'arbre.

Il convient d'ajouter à ces étapes, une étape préliminaire de connaissance du système. Nous verrons que cette dernière est primordiale pour mener l'analyse et qu'elle nécessite le plus souvent une connaissance préalable des risques.



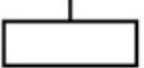





Événement / report	Dénomination	Portes	Dénomination
	Événement de base		Porte « ET »
	Événement-sommet ou événement intermédiaire		Porte « OU »
	Report (sortie) Le sous-arbre situé sous ce « drapeau » est à dupliquer ...		Porte « OU exclusif »
	Report (entrée) ...à l'endroit indiqué par ce second drapeau		Porte « combinaison »

Tableau 5 - Syntaxes des arbres de défaillance

### 5.4.3. DEFINITION DE L'ÉVÉNEMENT REDOUTÉ

La définition de l'événement final, qui fera l'objet de l'analyse, est une étape cruciale pour la construction de l'arbre. On conçoit que plus cet événement est défini de manière précise, plus simple sera l'élaboration de l'arbre des défaillances.

De manière classique, les événements considérés peuvent concerner le rejet à l'atmosphère de produits toxiques ou inflammables, le risque d'incendie, d'explosion...

## 5.4.4. ELABORATION DE L'ARBRE

La construction de l'arbre des défaillances vise à déterminer les enchainements d'évènements pouvant conduire à l'évènement final retenu. Cette analyse se termine lorsque toutes les causes potentielles correspondent à des évènements Élémentaires l'élaboration de l'arbre des défaillances suit le déroulement présenté en Figure 4.

La recherche systématique des causes immédiates, nécessaires et suffisantes (INS) est donc à la base de la construction de l'arbre. Il s'agit probablement de l'étape la plus délicate et il est souvent utile de procéder à cette construction au sein d'un groupe de travail pluridisciplinaire.

Afin de sélectionner les évènements intermédiaires, il est indispensable de procéder pas à pas en prenant garde à bien identifier les causes directes et immédiates de l'évènement considéré et se poser la question de savoir si ces causes sont bien nécessaires et suffisantes. Faute de quoi, l'arbre obtenu pourra être partiellement incomplet voire erroné.

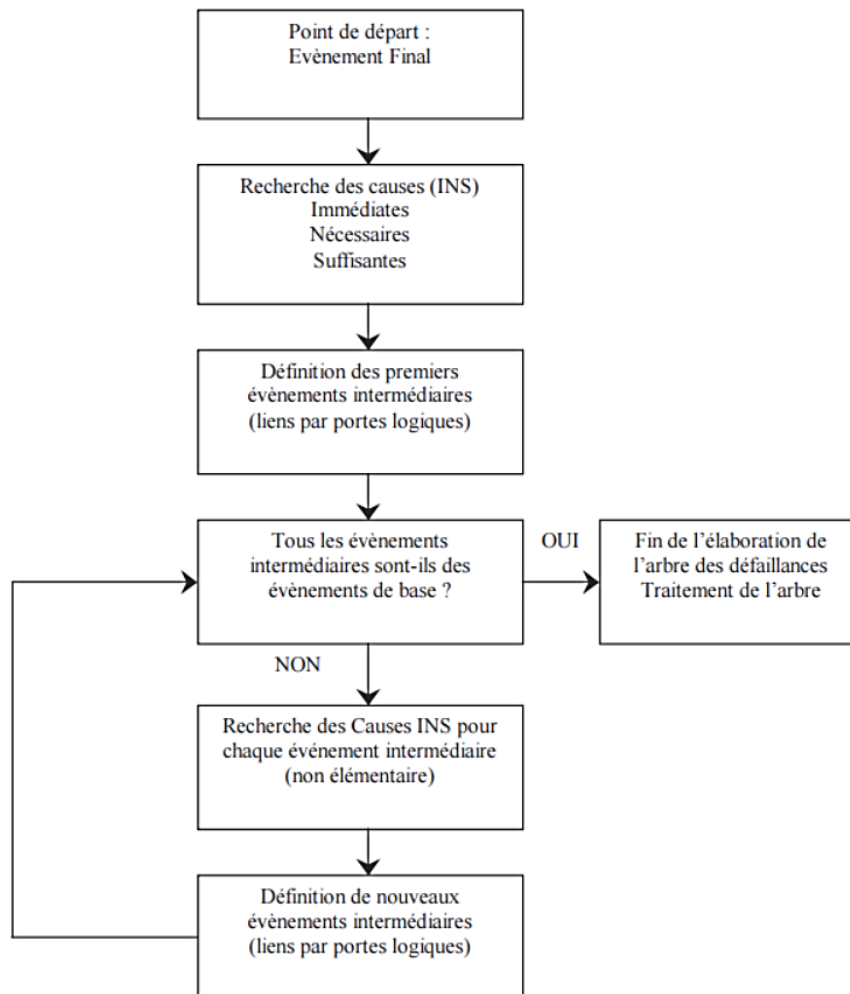


Figure 3 - Démarche pour l'élaboration d'un arbre des défaillances. Cette démarche est facilitée par l'application préalable d'une méthode du type APR, HAZOP ou AMDEC

Enfin, il est nécessaire de respecter certaines règles supplémentaires à observer durant la construction de l'arbre à savoir :

- Vérifier que le système est cohérent, c'est-à-dire que :
  - La défaillance de tous ses composants entraîne la défaillance du système,
  - Le bon fonctionnement de tous ses composants entraîne le bon fonctionnement du système,
  - Lorsque le système est en panne, le fait de considérer une nouvelle défaillance ne rétablit pas le fonctionnement du système,
  - Lorsque le système fonctionne correctement, la suppression d'une défaillance ne provoque pas la défaillance du système.
- S'assurer que tous les événements d'entrée d'une porte logique ont bien été identifiés avant d'analyser leurs causes respectives,
- Éviter de connecter directement deux portes logiques, ne sélectionner que les causes antérieures à l'existence de l'événement considéré.

En définitive, l'application de ces règles conduit à la construction d'un arbre de la forme suivante.

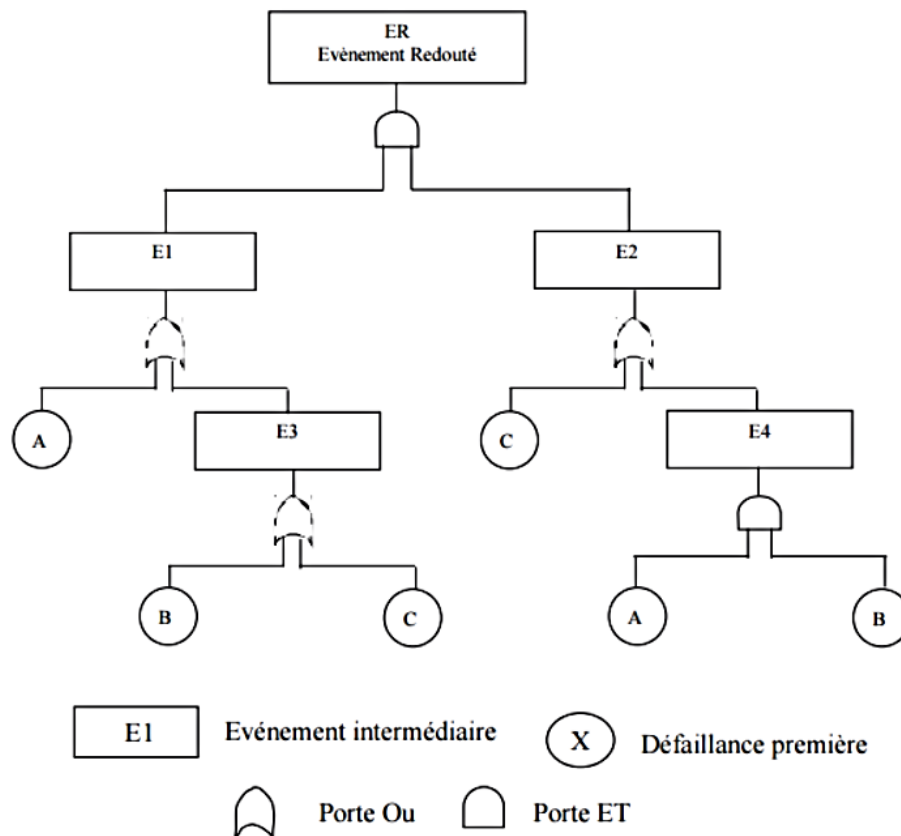


Figure 4 - Exemple d'arbre des défaillances [17]

## 5.4.5. EXPLOITATION DE L'ARBRE DES DÉFAILLANCES

L'exploitation de l'arbre des défaillances peut être réalisée de manière qualitative et quantitative. Elle nécessite au préalable de traiter les résultats fournis au cours de la construction de l'arbre. Dans l'exemple précédent (Figure 5), les événements A, B et C apparaissent plusieurs fois dans l'arbre : il n'y a donc pas indépendance des événements de base. Ainsi, il est indispensable d'éliminer ces fausses redondances préalablement à l'exploitation de cet arbre.

L'élimination des fausses redondances fait appel aux notions de coupes minimales et de réduction d'arbres.

### 5.4.5.1. COUPES MINIMALES – REDUCTION D'ARBRE

Une coupe minimale représente la plus petite combinaison d'événements pouvant conduire à l'événement indésirable ou redouté. On parle parfois également de « chemin critique »

Dans l'exemple précédent, l'occurrence simultanée des événements A, B et C conduit effectivement à l'événement final. Il ne s'agit cependant pas d'une coupe minimale puisque la combinaison A.B seule peut être à l'origine de l'événement final.

La recherche des coupes minimales est effectuée à partir des règles de l'algèbre de BOOLE en considérant que :

- À chaque événement de base correspond une variable booléenne,
- L'événement de sortie d'une porte « ET » est associé au produit des variables Booléennes correspondant aux événements d'entrée,
- L'événement de sortie d'une porte « OU » est associé à la somme des variables Booléennes correspondant aux événements d'entrée,

Propriétés	Produit « ET »	Somme « OU »
Commutativité	$A.B = B.A$	$A+B = B+A$
Idempotence	$A.A = A$	$A+A = A$
Absorption	$A.(A+B) = A$	$A+A.B = A$
Associativité	$A.(B.C) = (A.B).C$	$A+(B+C) = (A+B)+C$
Distributivité	$A.(B+C) = AB + AC$	$A+B.C = (A+B).(A+C)$

Tableau 6 Principales règles de l'algèbre de BOOLE

Ainsi, dans l'exemple précédent, la recherche des coupes minimales peut s'effectuer comme suit :

$$ER = E1 E2$$

$$E1 = A + E3 \text{ avec } E3 = B + C$$

$$E2 = C + E4 \text{ avec } E4 = A.B$$

Au total, nous avons donc :

$$ER = (A+B+C) (C+A.B) = A.C + A.B + B.C + A.B + C + C.A.B$$

Or,  $A.C + C = C$  et  $A.B + A.B.C = A.B$  (par absorption)

$$ER = C + A.B + B.C + A.B$$

De plus,  $A.B + A.B = A.B$  (Idempotence) et  $C + B.C = C$  (Absorption)

$$D'où ER = C + A.B$$

Ainsi, l'événement C seul ou la combinaison des événements A.B conduisent à l'événement redouté. Il n'existe pas de combinaison plus petite conduisant à cet événement. L'arbre présenté en exemple admet donc deux coupes minimales : C ainsi que A.B.

L'ordre d'une coupe est alors défini comme le nombre d'événements combinés qui figurent dans cette coupe.

Finalement, cet arbre comporte :

- Une coupe minimale d'ordre 1 C,
- Une coupe minimale d'ordre 2 : A.B.

L'arbre représentant ces coupes minimales est appelé « arbre réduit ». Pour l'exemple considéré dans la Figure 4, l'arbre réduit est le suivant.

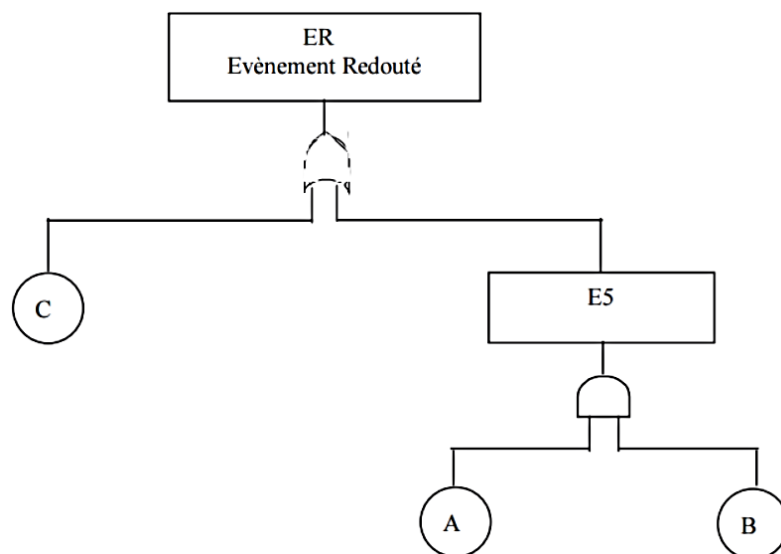


Figure 5 - Réduction de l'arbre des défaillances pris en exemple [17]

### **5.4.5.2. EXPLOITATION QUALITATIVE DE L'ARBRE DES DÉFAILLANCES**

L'exploitation qualitative de l'arbre vise à examiner dans quelle proportion une défaillance correspondant à un événement de base peut se propager dans l'enchaînement des causes jusqu'à l'évènement final. Pour cela, tous les évènements de base sont supposés équiprobables et on étudie le cheminement à travers les portes logiques d'évènement ou de combinaisons d'évènements jusqu'à l'évènement final.

De manière intuitive, une défaillance se propageant à travers le système en ne rencontrant que des portes « OU » est susceptible de conduire très rapidement à l'évènement final. A l'inverse, un cheminement s'opérant exclusivement à travers des portes « ET » indique que l'occurrence de l'évènement final à partir de l'évènement ou la combinaison d'évènements de base est moins probable et démontre ainsi une meilleure prévention de l'évènement final.

La définition des coupes minimales permet d'accéder directement aux évènements et combinaisons d'évènements les plus critiques pour le système considéré. Ainsi, plus l'ordre d'une coupe minimale est petit, plus l'occurrence de l'évènement final suivant ce chemin critique peut paraître probable. Un moyen de prévenir les évènements indésirables ou redoutés vise à modifier l'arbre des défaillances en vue d'obtenir des coupes minimales d'ordre le plus élevé possible, par l'introduction de portes « ET » par exemple.

Cette approche qualitative repose néanmoins sur l'hypothèse relativement forte que les évènements de base sont équiprobables. Il peut cependant arriver qu'une coupe minimale d'ordre 1 corresponde à un événement extrêmement peu probable alors qu'une coupe minimale d'ordre supérieur peut correspondre à des combinaisons d'évènements très probables.

### **5.4.5.3. EXPLOITATION QUANTITATIVE DE L'ARBRE DES DÉFAILLANCES**

L'exploitation quantitative de l'arbre des défaillances vise à estimer, à partir des probabilités d'occurrence des évènements de base, la probabilité d'occurrence de l'évènement final ainsi que des évènements intermédiaires. Elle doit être mise en œuvre dans l'optique de hiérarchiser les différentes causes possibles et de concentrer les efforts en matière de prévention sur les causes les plus vraisemblables.

# CHAPITRE I : Démarche et méthodes d'analyse des risques.

En pratique, il est souvent difficile d'obtenir des valeurs précises de probabilités des évènements de base. En vue de les estimer, il est possible de faire appel à :

- Des bases de données,
- Des jugements d'experts,
- Des essais lorsque cela est possible,
- Au retour d'expérience sur l'installation ou des installations analogues.

A partir des probabilités des évènements de base, il s'agit de remonter dans l'arbre des défaillances en appliquant les règles suivantes :

Porte « OU »	Porte « ET »
$P(S) = P(E1) + P(E2) - P(E1).P(E2)$ (Théorème de POINCARRE)  Lorsque la probabilité des évènements de base est faible, il est possible de négliger le produit $P(E1).P(E2)$ et de considérer :  $P(S) \approx P(E1) + P(E2)$	$P(S) = P(E1).P(E2)$

Figure 6 - Règles générales de calcul des probabilités

Les logiciels informatiques développés depuis une quinzaine d'années permettent de déterminer automatiquement les probabilités tout au long de l'arbre.

L'examen des probabilités des évènements intermédiaires conduisant à l'évènement final permet de hiérarchiser les priorités de modifications du système en identifiant les causes les plus probables d'un évènement indésirable ou final.

La réduction de la probabilité de cet évènement final peut alors être envisagée de plusieurs manières :

- En supprimant ou réduisant la probabilité d'occurrence des évènements de base,

- En améliorant la fiabilité du système par l'ajout de portes « ET » entre l'événement final et les événements de base. Les portes « ET » placées au plus proche de l'événement final permettent de traiter un maximum de coupes minimales et, le cas échéant, de traiter certaines causes qui n'auraient pas été envisagées.

Cette dernière stratégie correspond en pratique à l'ajout de barrières de sécurité. L'événement final ne peut alors se produire que si l'événement de base se produit et si la barrière de sécurité destinée à le compenser est elle-même défaillante.

### 5.4.6. LIMITES ET AVANTAGES

Le principal avantage de l'analyse par arbre des défaillances est qu'elle permet de considérer des combinaisons d'évènements pouvant conduire in fine à un événement redouté. Cette possibilité permet une bonne adéquation avec l'analyse d'accidents passés qui montre que les accidents majeurs observés résultent le plus souvent de la conjonction de plusieurs évènements qui seuls n'auraient pu entraîner de tels sinistres.

Par ailleurs, en visant à l'estimation des probabilités d'occurrence des évènements conduisant à l'événement final, elle permet de disposer de critères pour déterminer les priorités pour la prévention d'accidents potentiels.

L'analyse par arbre des défaillances porte sur un événement particulier et son application à tout un système peut s'avérer fastidieuse. En ce sens, il est conseillé de mettre en œuvre au préalable des méthodes inductives d'analyse des risques.

Ces outils permettent d'une part d'identifier les évènements les plus graves qui pourront faire l'objet d'une analyse par arbre des défaillances et, d'autre part, de faciliter la détermination des causes immédiates, nécessaires et suffisantes au niveau de l'élaboration de l'arbre.

Depuis une quinzaine d'années, des logiciels informatiques sont commercialisés afin de rendre plus aisée l'application de l'arbre des défaillances. Ces outils se montrent très utiles pour la recherche des coupes minimales, la détermination des probabilités ainsi que pour la présentation graphique des résultats sous forme arborescente.



### **5.5. L'ANALYSE DE DYSFONCTIONNEMENT PAR LES OUTILS DE LA THEORIE STOCHASTIQUE :**

#### **5.5.1. SIMULATION DE MONTE-CARLO**

Appelée Monte-Carlo par von Neumann par allusion aux jeux de hasard, le principe de la simulation de Monte-Carlo consiste à remplacer le calcul analytique par du calcul statistique en réalisant un grand nombre d'histoires du système étudié. [25]

L'approche consiste à créer un grand nombre de scénarii en répétant l'attribution d'une valeur numérique aux variables dépendant du déroulement des processus stochastiques.

Le principe de la simulation Monte Carlo est de développer un modèle analytique basé sur des tirages aléatoires. Le modèle est évalué en utilisant des données sur le système, pour prévoir son comportement, habituellement par de multiples simulations. Chaque évaluation (ou simulation d'un cycle) est basée sur des conditions aléatoires pour les paramètres d'entrée, puis un traitement statistique est effectué sur la distribution de probabilités des résultats successifs obtenus (calcul de moyenne, de la dispersion, etc.).

L'inconvénient de cette méthode est qu'il est obligatoire d'augmenter le nombre des simulations pour affiner l'évaluation des résultats. [23]

La description du système doit, à chaque événement, décrire le comportement du système face aux défaillances à savoir toutes les étapes de :

- Détection de la panne
- Diagnostic de l'état du système
- Changement de mode de fonctionnement
- Maintenance des composants endommagés
- Remise en service

#### **5.5.2. LES GRAPHS DE MARKOV :**

Sont connus pour leurs utilisations et mises en œuvre pour le traitement probabiliste des systèmes se comportant dynamiquement. Ils entrent dans la classe des approches analytiques par états basées sur l'identification des différents états (méthode de l'espace d'états) du système concerné puis sur l'analyse de la dynamique d'évolution entre ces états.

Cette approche Markovienne consiste à représenter le fonctionnement d'un système par un ensemble de composants pouvant se trouver dans un nombre fini d'états de fonctionnement et de panne. Le graphe des états permet de visualiser les différents états d'un système qui sont représentées par des cercles et relier entre eux par des arcs orientés qui correspondent aux transitions (pannes et réparations) entre états.

Les graphes de Markov sont couramment utilisés pour étudier la fiabilité des systèmes réparables. Le modèle associe une représentation graphique et une écriture matricielle (matrice de transition). [23]

### **5.5.3. LES RESEAUX DE PETRI :**

Sont un outil d'analyse de la structure et du comportement des systèmes dynamiques à événements discrets.

Basés sur la description des relations existant entre les conditions et les événements intervenant sur le système, ils s'appuient sur une représentation mathématique qui s'ouvre à différentes formes d'analyse. Un réseau de Petri est un graphe orienté constitué de places, de transitions et d'arcs :

- Les places sont représentées graphiquement par des cercles et peuvent être marquées par une ou plusieurs marques appelées jetons. L'ensemble des jetons associés aux différentes places constitue le marquage de réseau et correspond à un état du système modélisé, Facteurs Organisationnels Facteurs Humains Facteurs Techniques Evénement indésirable.
- Les transitions sont représentées par des rectangles et agissent, sous certaines conditions, sur le marquage du réseau.
- Les arcs sont représentés par des flèches qui lient une place à une transition (arc amont) ou inversement une transition à une place (arc aval). Un poids (entier positif) peut leur être affecté. Par défaut, il est égal à 1. [23]

### **5.5.4. LES RESEAUX BAYESIENS :**

#### **5.5.4.1. Définition du Réseau Bayésien (RB) :**

Un réseau bayésien est un outil complet permettant la visualisation de variables et de leurs dépendances (ou indépendances). Il permet également de décrire quantitativement le fonctionnement d'un système grâce aux différents calculs de probabilités concernant les variables du système. Généralement, on modélise les variables aléatoires comme étant des

nœuds. On peut alors dresser un arc entre certaines variables du système. Les arcs tracés peuvent rendre compte d'un phénomène de causalité entre les variables reliées (réseaux causaux).

Les réseaux bayésiens interdisent les dépendances enfant vers parents. Ainsi, l'ensemble de variables et des arcs vont former un graphe dirigé (les arcs possèdent un sens), et acyclique (pas de cycle dans le graphe). [26]

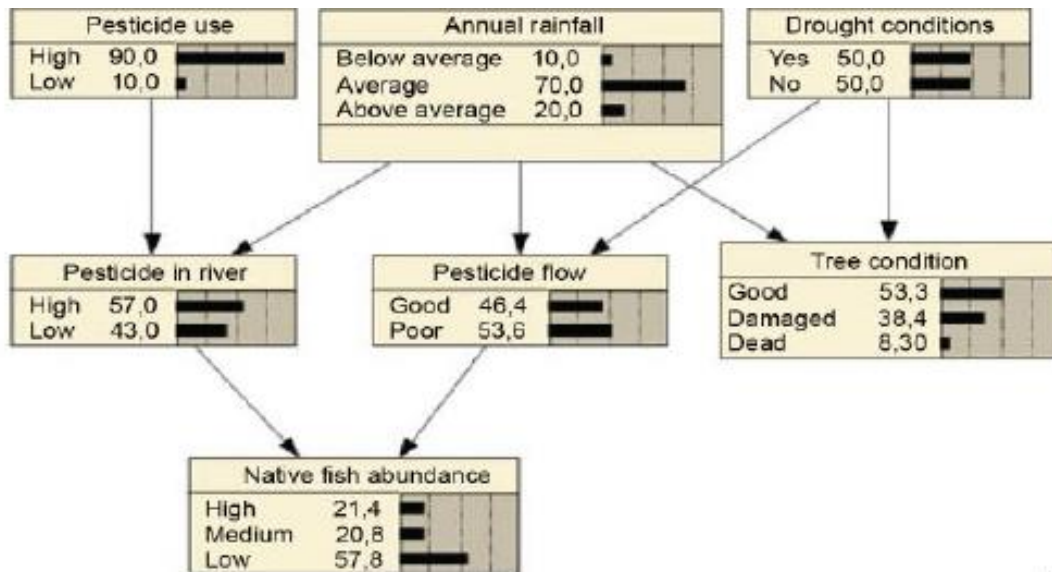


Figure 7 - Un réseau bayésien montrant une version simplifiée d'un problème écologique réel

De manière formelle, un réseau bayésien est défini par :

- Un graphe acyclique orienté  $G$  (DAG : Direction acyclic graph),  $G = (V, E)$ , où  $V$  est l'ensemble des nœuds de  $G$ , et  $E$  est l'ensemble des arcs de  $G$ , ainsi  $G = (V, E)$ .  $V$  symbolise un ensemble de variables aléatoires  $X$ ,  $X = \{X_1, X_2\}$ .
- Sa composante quantitative  $\mu$  représentée par des tables de probabilités (TP) pour les nœuds parents et des tables de probabilités conditionnelles (TPC) pour les nœuds descendants,  $\mu = \{\mu_i\} = \{P(X_i/\text{Parents}(X_i))\}$ . [27]

La Figure 8 présente un exemple ordinaire d'un réseau bayésien à deux variables.

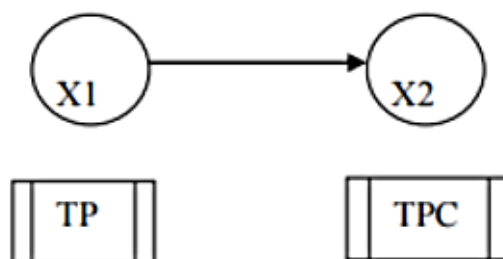


Figure 8 - Exemple d'un réseau Bayésien à deux variables

Les réseaux bayésiens sont donc une représentation à la fois qualitative et quantitative des relations entre les variables. Ces variables peuvent être discrètes (TP, TPC) ou continues, observables ou non observables et peuvent prendre différents états (vrai/faux, une échelle de probabilité) [28]

Le calcul dans un réseau bayésien s'appuie sur le théorème de Bayes. Soit deux variables aléatoires  $X_1$  et  $X_2$ , la probabilité conditionnelle de  $X_2$  sachant  $X_1$  est déterminée par la formule suivante : [27]

$$P(X_2/X_1) = \frac{P(X_1/X_2) P(X_2)}{P(X_1)} \quad (1)$$

- $P(X_1)$  est la probabilité a priori (ou marginale) de  $X_1$ .
- $P(X_2/X_1)$  est la probabilité a posteriori de  $X_2$  sachant  $X_1$ .
- $P(X_1/X_2)$  est la fonction de vraisemblance de  $X_1$  connaissant  $X_2$ .

Dans le cas général, où  $X = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ , la fonction de distribution de probabilités jointe  $P(X)$  s'écrit comme suit :

$$P(X) = \prod_{i=1}^n P(X_i/\text{parents}(X_i)) \quad (2)$$

#### 5.5.4.2. Les avantages des Réseaux Bayésiens :

Nous listons leurs principaux avantages ci-après :

- Les RB peuvent être utilisés pour apprendre des dépendances causales et pour modéliser des phénomènes aléatoires,
- Un RB est une représentation graphique compacte et synthétique avec une facilité d'acquisition et d'utilisation de la connaissance,
- Les RB peuvent combiner plusieurs aspects à la fois, des statistiques, des probabilités, de l'aide à la décision et le management des connaissances,
- Pour l'utilisation, leur flexibilité permet d'interroger le même modèle graphique pour des objectifs différents, tels que la prédiction ou le diagnostic,
- De surcroît, ils permettent de modéliser la connaissance par une attribution des probabilités même si les données sont de nature incertaine,

- Les algorithmes dédiés au calcul offrent un outil puissant pour la fusion des données incomplètes avec prise en compte des jugements des experts,
- Pour les applications industrielles, la qualité de l'offre en matière d'outils rend les RB de plus en plus séduisants... [29]

### 5.5.4.3. Propriétés du Réseau Bayésien :

Dans la théorie des graphes, les propriétés des modèles se présentent comme des outils théoriques permettant leur développement. Nous allons à présent étudier quelques propriétés des réseaux Bayésiens : [27]

#### 5.5.4.3.1. Indépendance conditionnelle :

Soit X, Y et Z trois variables aléatoires, X est indépendante conditionnellement de Y sachant Z, si et seulement si  $P(X|Y,Z) = P(X|Z)$ . Cette propriété se traduit par le fait que sachant l'état Z, l'état de Y n'influence pas l'état de X (Figure 9). Ce résultat est fondamental dans l'utilisation des réseaux Bayésiens, il est très utile dans la recherche des structures graphiques d'un réseau et permet de limiter les calculs de probabilités dans un graphe causal.

Un graphe représentant des indépendances conditionnelles détient davantage de propriétés, comme celles de Markov. [27]

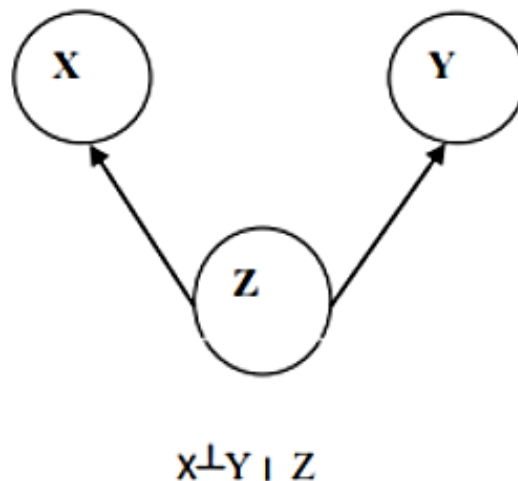


Figure 9 - Indépendance conditionnelle (connexion divergente)

#### 5.5.4.3.2. Boucle dans un réseau bayésien :

La structure d'un réseau bayésien ne doit pas contenir de circuits orientés Figure 10.

Cependant, l'un des résultats théoriques montrant la puissance de modélisation par RB indique qu'il existe toujours une représentation par RB des lois conjointes quelles que soient les dépendances stochastiques entre les variables aléatoires.

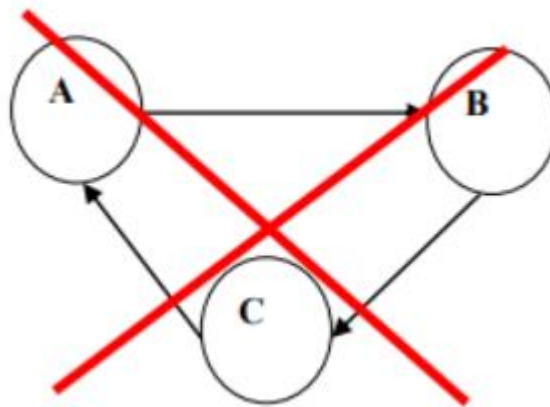


Figure 10 - Boucle dans un réseau bayésien [27]

### 5.5.5. METHODES ALGORITHMIQUES :

Pour construire et utiliser un réseau bayésien, nous devons introduire les deux concepts d'apprentissage et d'inférence, ce sont les deux principaux problèmes dans le raisonnement probabiliste bayésien : [28]

#### 5.5.5.1. L'apprentissage :

L'apprentissage dans un réseau bayésien est une approche inductive. Nous distinguons deux types d'apprentissage : paramétrique et structurel. Le premier permet d'estimer les lois de probabilités conditionnelles (paramètres) étant donnée une structure de RB, quant au second, il vise à déterminer une structure graphique optimale du modèle à partir d'un ensemble de données observées. Il convient de noter que le nombre de structures graphiques apprises croît de manière super-exponentielle en fonction du nombre de variables du réseau (par exemple, pour dix nœuds le nombre de graphes possibles est environ  $4 \times 10^{18}$ ).

Notons aussi que les deux apprentissages peuvent être complémentaires pour un problème donné et qu'une structure peut être définie à partir des avis des experts, de même pour l'estimation des distributions de probabilités. L'apprentissage trouve son intérêt lorsque les jugements de l'expert présentent leurs limites ou quand la taille de données et le nombre de nœuds sont importants. [28]

## 5.5.5.2. L'inférence :

L'inférence dans un réseau bayésien est une approche déductive, l'objectif de l'inférence est de calculer (ou de mettre à jour) n'importe quelle probabilité conditionnelle d'une variable du modèle à partir de la structure causale (arbre causes à effets) et les distributions de probabilités associées. Le théorème de Bayes et les lois de probabilités conditionnelles sont au cœur de ce calcul. Selon la complexité du réseau, nous distinguons deux types d'inférences : exacte et approchée. [28]

La Figure 11 résume les principales familles d'apprentissage et d'inférence dans les réseaux bayésiens.

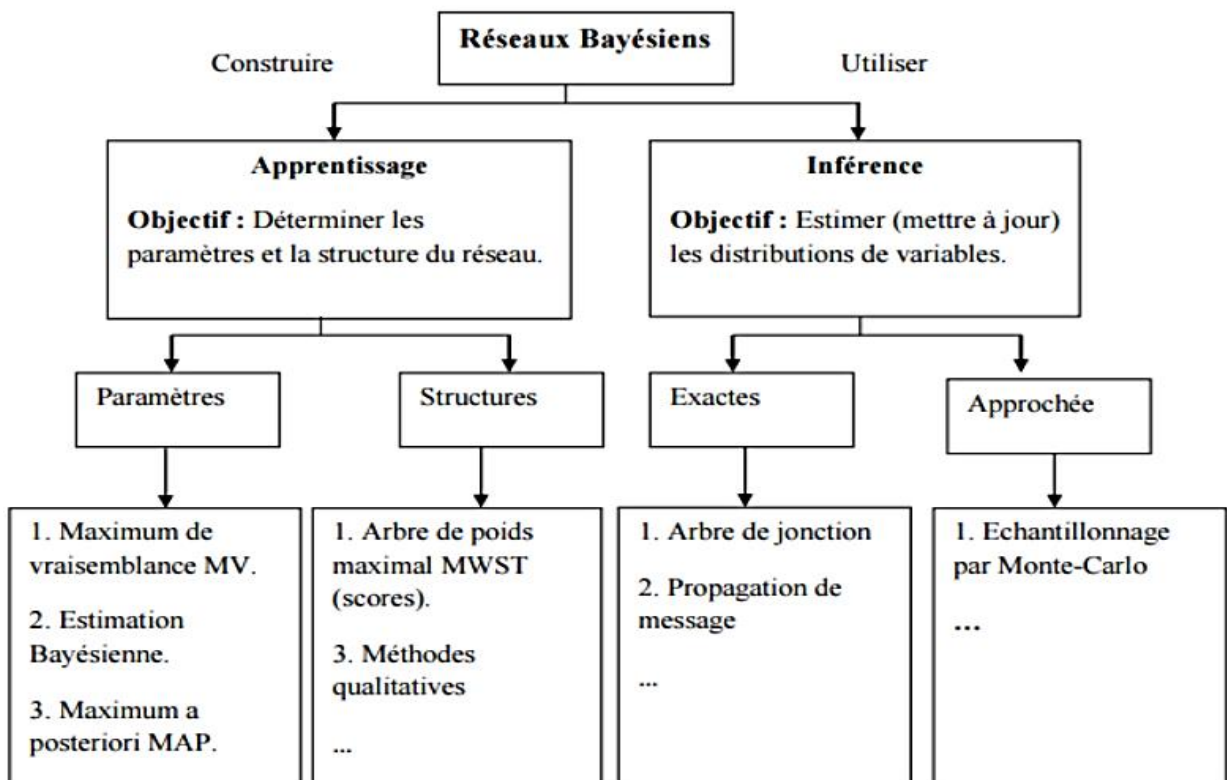


Figure 11 - Apprentissage et inférence dans les réseaux Bayésiens

## 6. CONCLUSION :

Les méthodes d'analyse décrites dans ce chapitre sont fréquemment utilisées dans le domaine de prévention des risques, elles permettent d'identifier les causes et les conséquences potentielles liés à l'exploitation d'installations industrielles

Par ailleurs, il n'existe pas de bonne ou mauvaise méthode d'analyse des risques, une méthode particulière est donc généralement plus ou moins adaptée au contexte de l'installation étudiée et aux objectifs recherchés

## **CHAPITRE II : Présentation générale du silo agro-alimentaire.**



### 1. INTRODUCTION

Tout système de production a associé plusieurs problèmes, des problèmes techniques en particulier, ces derniers peuvent contribuer à des risques d'accidents pouvant provoquer des catastrophes, et pour éviter ou minimiser la probabilité de l'occurrence des accidents il est important de connaître la structure de ce système.

Dans ce chapitre nous présentons d'une façon générale le silo agroalimentaire, ainsi que ses différents équipements, la composition et le principe de fonctionnement de chaque équipement et le fonctionnement du silo depuis la réception jusqu'à l'expédition.

### 2. JUSTIFICATION DU CHOIX DU THEME

Plusieurs raisons nous ont amené à porter la réflexion sur ce type de sujet. Ces raisons sont aussi pertinentes les unes que les autres.

D'abord, Les silos sont les structures les plus utilisées dans le monde pour le stockage des produits destiné à la vente ou à l'utilisation sur place dans différentes industries tel qu'industrie du bois, du ciment, l'industrie agroalimentaire, cette dernière est l'une qu'on a étudié,

Par ailleurs, les silos présentent des risques d'incendie, des risques de nuisances sonores, des risques de pollution des eaux, d'explosion de poussières, ce dernier présente le plus danger vue que poussière est présente dans toute l'installation et avec quantité importante, et suivant les statistiques au cours du dernier siècle, 1074 explosions de grains ont été recensées. Les 20 années entre 1980 jusqu'à 2000 ont contribué à ce chiffre à hauteur de 220 explosions. Ces 220 explosions ayant par ailleurs engendrées la mort de 148 personnes.

En outre Les explosions de poussières restent encore aujourd'hui très fréquentes malgré les efforts pour parer ces accidents, et il est communément admis qu'il se produit environ une explosion de poussières par jour en France dans l'industrie.

Donc Face à l'importance de ce type de structure, et face aux accidents augmentant chaque année, on a porté notre étude sur l'analyse des risques des silos agro-alimentaire.

### **3. BASE REGLEMENTAIRE RELATIF AUX SILOS AGROALIMENTAIRES :**

#### **3.1. REGLEMENTATIONS NATIONALES ALGERIENNES :**

**Arrêté du 29 Rabie El Aouel 1425 correspondant au 19 mai 2004 fixant les règles de sécurité relatives aux terrils, dépôts de stériles, espaces clos, silos et trémies.**

- **ARTICLE 8**

Les silos et trémies destinés à recevoir des produits pulvérulents ou grenus devront être conçus et aménagés de manière à éviter :

- Tout accès même volontaire à des personnes non autorisées.
- Tout risque de chute tant à l'intérieur qu'à l'extérieur des trémies.

- **ARTICLE 9**

Il est interdit d'entrer dans une soute, une trémie ou un silo de stockage qui contient des matériaux, ou de travailler sur un tas de matériaux qui peut se déplacer par gravité, à moins que :

- Des précautions appropriées ne soient prises pour éviter l'effondrement ou le glissement des matériaux ;
- Le travailleur ne porte une ceinture de sécurité et un cordon d'assujettissement antichute ;
- Une ou plusieurs personnes ne se trouvent constamment sur place assistant le travailleur en gardant assez tendue la corde de sécurité qui doit être solidement ancrée en tout temps ;
- Une méthode de verrouillage conforme à l'article 4 ne soit appliquée pendant le chargement et le déchargement de la soute, du silo ou de la trémie et que des signaux d'avertissement et d'autres moyens efficaces de protection ne soient utilisés pour empêcher le déversement de matériaux dans le silo.

- **ARTICLE 10**

Les employeurs prennent les mesures nécessaires pour que les ouvertures, les exploitations à ciel ouvert, les puisards, les récipients et les plates-formes élevées qui constituent un danger réel ou potentiel soient clôturés ou protégés d'une autre manière.

**Décret exécutif n° 07-144 du 2 Joumada El Oula 1428 correspondant au 19 mai 2007 fixant la nomenclature des installations classées pour la protection de l'environnement.**

N° de la rubrique	Désignation de l'activité	Type d'autorisation	Rayon d'affichage (Km)	Etude d'impact	Etude de danger	Notice d'impact	Rapport sur les produits dangereux
2126	Silos et installations de stockage de céréales, grains, produits alimentaires ou tout produit organique dégageant des poussières inflammables						
	1. En silos ou installations de stockage						
	a) Si le volume total de stockage est supérieur à 15 000 m <sup>3</sup>	AM	3	X	X		
	b) Si le volume total de stockage est supérieur à 5000 m <sup>3</sup> , mais inférieur ou égal à 15000 m <sup>3</sup>	AW	1	X	X		

AM : Autorisation ministériel

AW : Autorisation du wali

### 3.2. REGLEMENTATION FRANÇAISE

**Arrêté du 29 juillet 1998 relatif aux silos et aux installations de stockage de céréales, de graines, de produits alimentaires ou de tous autres produits organiques dégageant des poussières inflammables**

#### TITRE I : DOMAINE D'APPLICATION

##### • ARTICLE 1

Le présent arrêté est applicable aux silos et aux installations de stockage de céréales, de graines, de produits alimentaires et de tous autres produits organiques dégageant des poussières inflammables soumis à autorisation au titre de la rubrique 2160 de la nomenclature des installations classées pour la protection de l'environnement.

Au sens du présent arrêté, le terme : "silo" désigne l'ensemble :

- Des capacités de stockage type vrac quelle que soit leur conception (silos plats, silos verticaux, silos cathédrale, silos dôme, etc.) ;
- Des tours d'élévation ;

- Des fosses de réception, les galeries de manutention, les dispositifs de transport et de distribution (en galerie ou en fosse), les équipements auxiliaires (épierreurs, tarares, dépoussiéreurs, tamiseurs, séparateurs magnétiques ou tout autre dispositif permettant l'élimination de corps étrangers), les trémies de vidange et le stockage des poussières.

On désigne par silos plats avec stockage en tas des capacités de stockage pour lesquelles la hauteur des parois retenant les produits est inférieure à 10 mètres au-dessus du sol.

On désigne par boisseau de chargement ou boisseau de reprise la capacité de stockage située au-dessus d'un poste de chargement dont le volume est inférieur à 150 m<sup>3</sup> et dont le taux de rotation annuel est supérieur à 5.

### **TITRE II : DISPOSITIONS GENERALES**

#### **• ARTICLE 2**

L'exploitant doit disposer d'une étude des dangers au sens de l'article 3 du décret du 21 septembre 1977 susvisé. Cette étude doit comporter une analyse des risques recensant, décrivant et étudiant tous les accidents susceptibles d'intervenir afin d'aboutir à l'étude des scénarios d'accident. Dans l'étude des dangers, sont déterminés les paramètres et équipements importants pour la sécurité des silos en fonctionnement normal, transitoire ou en situation accidentelle. Elle justifie que les fonctions de sécurité mises en place pour la prévention et la lutte contre les accidents sont bien adaptées.

Toute modification envisagée par l'exploitant aux silos, tels que définis à l'article 1er du présent arrêté, à leur mode d'utilisation ou à leur voisinage de nature à entraîner un changement notable des éléments des dossiers de demande d'autorisation, est portée, avant sa réalisation, à la connaissance du préfet avec tous les éléments d'appréciation.

#### **• ARTICLE 3**

L'exploitation doit se faire sous la surveillance d'une personne nommément désignée par l'exploitant et spécialement formée aux spécificités du silo et aux questions de sécurité.

### • ARTICLE 4

Les consignes de sécurité et les procédures d'exploitation de l'ensemble des installations comportent explicitement la liste détaillée des contrôles à effectuer en marche normale, à la suite d'un arrêt pour travaux de modification ou d'entretien des silos et à la remise en service de ceux-ci en cas d'incident grave ou d'accident. Les consignes de sécurité sont tenues à jour et affichées dans les lieux fréquentés par le personnel. Les procédures d'exploitation sont tenues à jour et mises à la disposition de l'inspection du travail et de l'inspection des installations classées.

### • ARTICLE 5

L'exploitant d'un silo est tenu de déclarer dans les meilleurs délais à l'inspection des installations classées les accidents ou incidents survenus du fait du fonctionnement de cette installation qui sont de nature à porter atteinte aux intérêts mentionnés à l'article 1er de la loi du 19 juillet 1976, conformément à l'article 38 du décret du 21 septembre 1977 susvisé.

### • ARTICLE 6

"Conformément aux dispositions du code du travail, les parties du silo dans lesquelles il peut y avoir présence de personnel doivent comporter des dégagements permettant une évacuation rapide. Les schémas d'évacuation sont rédigés par l'exploitant et affichés en des endroits fréquentés par le personnel."

## **TITRE III : IMPLANTATION ET AMENAGEMENT GENERAL DE L'INSTALLATION**

### • ARTICLE 7

La délivrance de l'autorisation d'exploiter un silo est subordonnée à l'éloignement des capacités de stockage (à l'exception des boisseaux visés à l'article 1er du présent arrêté) et des tours d'élévation par rapport aux habitations, aux immeubles occupés par des tiers, aux immeubles de grande hauteur, aux établissements recevant du public, aux voies de circulation dont le débit est supérieur à 2 000 véhicules par jour, aux voies ferrées ouvertes au transport de voyageurs ainsi qu'aux zones destinées à l'habitation par des documents d'urbanisme opposables aux tiers. Cette distance est au moins égale à 1,5 fois la hauteur de l'installation concernée sans être inférieure à 25 m pour les silos plats et à 50 m pour les autres types de stockage et les tours d'élévation.

### • ARTICLE 8

La délivrance de l'autorisation d'exploiter un silo est subordonnée à l'éloignement des capacités de stockage (à l'exception des boisseaux visés à l'article 1er du présent arrêté) et des tours d'élévation par rapport aux voies de communication dont le débit est inférieur à 2 000 véhicules par jour (sauf les voies de desserte de l'établissement). Cette distance est au moins égale à 10 m pour les silos plats et à 25 m pour les autres types de stockage et les tours d'élévation.

### • ARTICLE 9

Dès lors qu'aucune prescription ne permet d'assurer une sécurité absolue du personnel qui n'est pas nécessaire au strict fonctionnement du silo ou d'autres installations utilisant les produits stockés dans le silo, tout bâtiment ou local occupé par ce personnel doit être éloigné des capacités de stockage (à l'exception des boisseaux visés à l'article 1er du présent arrêté) et des tours d'élévation. Cette distance est d'au moins 10 m pour les silos plats et 25 m pour les autres types de stockage et les tours d'élévation.

Dans le cas des silos nouveaux, dès lors qu'aucune prescription ne permet d'assurer une sécurité absolue du personnel susceptible d'y avoir accès, les locaux techniques (centrale d'aspiration, centrale de ventilation, centrale de production d'énergie, séchoirs, locaux électriques, etc.), les salles de contrôle et les salles de commande doivent être systématiquement éloignés des silos d'une distance de 10 m.

Pour les silos existants et dans le cas où les locaux visés au premier alinéa de l'article 9 ne peuvent être éloignés des silos pour des raisons de configuration géographique de l'établissement, l'étude des dangers prévue à l'article 2 du présent arrêté devra, d'une part, justifier cette situation, d'autre part, définir les mesures de sécurité complémentaires éventuelles à mettre en œuvre notamment en application de l'article 12 du présent arrêté.

### • ARTICLE 10

Sans préjudice de réglementations spécifiques, le silo doit être efficacement clôturé sur la totalité de sa périphérie à moins que le site lui-même ne soit clôturé. La clôture doit être implantée et aménagée de façon à faciliter toute intervention ou évacuation en cas de nécessité (passage d'engins de secours).

### 4. SCHÉMA GÉNÉRAL D'UN ÉTABLISSEMENT STOCKEUSE

Les silos de stockage équipant les établissements industriels manipulant et utilisant des produits agro-alimentaires peuvent comporter des installations liées à plusieurs types d'activités Figure 12.

Cette présentation a été notamment élaboré à partir notamment d'informations contenues dans une brochure [30] éditée par le Groupement des Exportateurs Français d'Équipements pour le Grain (G.E.F.E.G). Une présentation succincte des opérations et installations susceptibles d'être rencontrées dans un silo de stockage y est faite.

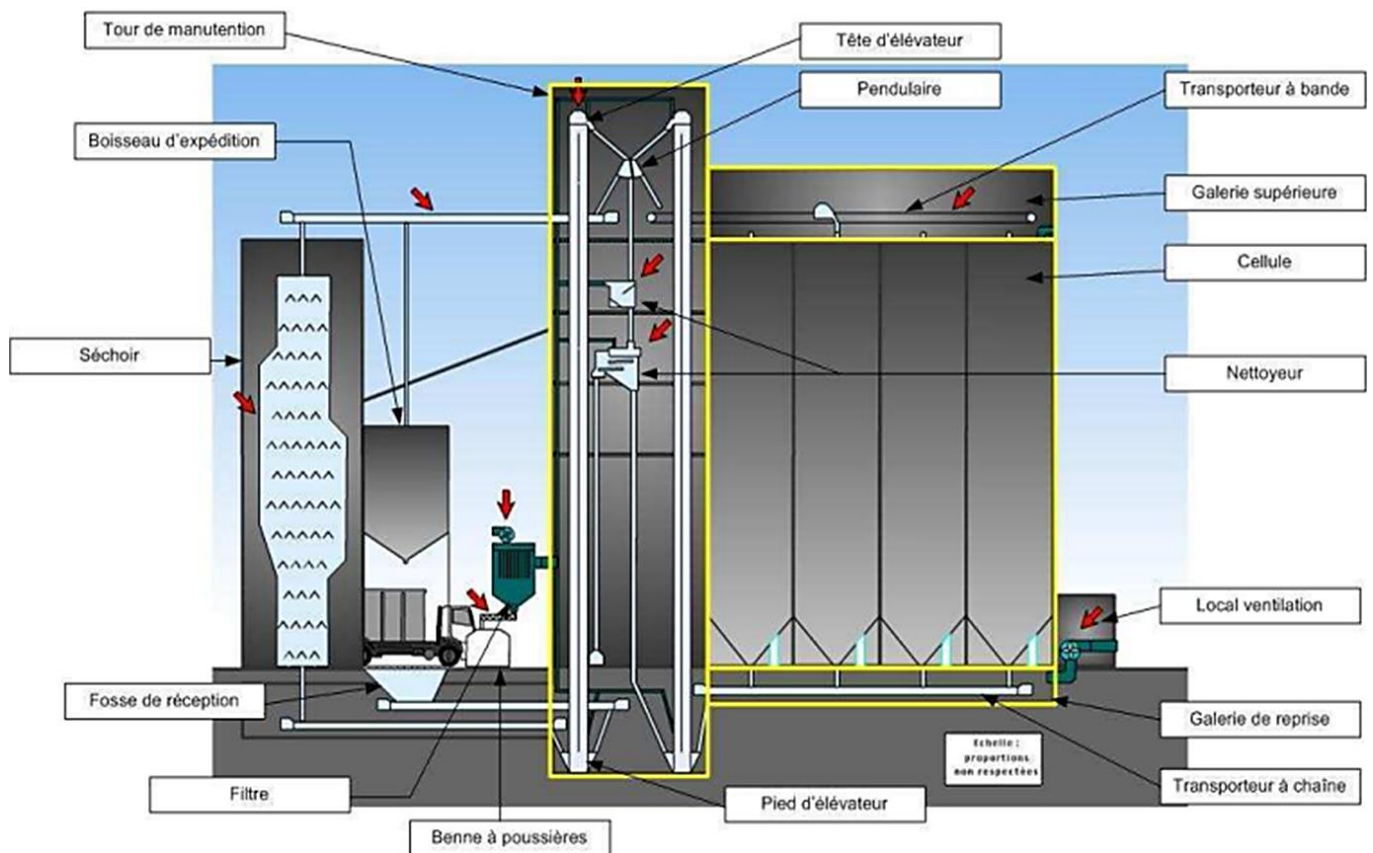


Figure 12 – Schéma général d'un établissement stockeur

Ces installations sont les suivantes :

- **Pour les activités de stockage :**
  - Les capacités de stockage type vrac,
  - Les tours de manutention,
  - Les postes de réception et d'expédition,
  - Les galeries de manutention,
  - Les dispositifs de transport et de distribution,

- Les équipements auxiliaires :
  - Dispositifs d'élimination des corps étrangers,
  - Appareils de nettoyage,
  - Dépoussiéreurs,
  - Ventilation,
- Les salles de contrôle et de commande, dont l'emplacement est variable,
- **Pour les activités connexes :**
  - Les séchoirs,
  - Les ateliers,
- **Pour les stockages annexes :**
  - Les stockages de produits agro-pharmaceutiques,
  - Les stockages d'engrais,

La Figure 12, ne vise qu'à représenter les installations pouvant exister dans un établissement " stockeur ". Sur celle-ci ne figurent pas la salle de contrôle et de commande, ni les équipements auxiliaires qui ont des lieux de situation variés selon les sites. Chaque cas est un cas d'espèce qui doit faire l'objet d'une étude spécifique.

Les opérations successives réalisées dans les silos de produits agro-alimentaires, sont toutes ou en partie les suivantes :

- La réception des matières,
- La préparation des matières avant stockage,
- L'ensilage des matières,
- Le stockage des matières,
- Le conditionnement des matières avant expédition,
- L'expédition des matières.



### 5. ACTIVITE DE STOCKAGE

#### 5.1. TYPES DE CELLULES OU DE CAPACITES DE STOCKAGE

En France, différentes techniques sont utilisées pour réaliser les stockages [31].

##### 5.1.1. Stockage vertical en métal

Cette technique peut s'adapter aux petites comme aux très grandes unités de stockage. Ce type de construction est très développé en raison de son faible coût.

En outre, l'avantage des cellules métalliques est :

- La facilité de transport,
- La simplicité du génie civil,
- La rapidité de fabrication,
- La rapidité et la facilité de montage des cellules quelles que soient les conditions climatiques,
- La standardisation de la production.

Beaucoup de silos de stockage de collecte des céréales et des oléoprotéagineux sont formés de cellules métalliques.



*Figure 13 - Silos verticaux en métal à fond conique*

### 5.1.2. Stockage vertical en béton armé.

Les cellules peuvent être réalisées selon la technique du coffrage glissant. Les cellules réalisées selon cette technique sont en général cylindriques, mais elles peuvent être aussi polygonales.

Les dimensions des cellules peuvent atteindre une soixantaine de mètres de hauteur, et une quarantaine de mètres de diamètre. Seules les cellules de très grand diamètre nécessitent l'emploi des techniques du béton précontraint. Ce type de construction en béton armé s'impose généralement quand il est nécessaire de réaliser des cellules de grande hauteur.



*Figure 14 - Silos verticaux en béton*

### 5.1.3. Stockage de type magasin ou stockage horizontal

Les cellules de stockage de type magasin ou stockage horizontal sont constitués de grands bâtiments de base rectangulaire, généralement de 20 m à 40 m de large.

Les parois sont de faible hauteur (de l'ordre de 5 à 6 m). Elles peuvent être réalisées en béton armé, ou en panneaux métalliques de type "profil oméga". La couverture du toit est réalisée en matériau léger. La manutention d'ensilage est en général accrochée à la charpente.

Le cloisonnement du volume de stockage peut être réalisé à partir d'éléments préfabriqués en béton ou métalliques mobiles, permettant ainsi la réalisation de cases modulables (fractionnement des capacités).

Ce type de stockage offre la possibilité d'une activité très polyvalente : stockage en vrac, stockage de produits différents, (tourteaux, manioc, ...) sous réserve que les parois soient calculées à cet effet. En revanche, il nécessite une surface de terrain importante.



*Figure 15 - Silos de stockage en métal à fond plat*

#### **5.1.4. Stockage « dôme »**

Un intérêt principal du stockage "dôme" réside dans les faibles moyens à mettre en œuvre pour sa construction et sa rapidité de construction. La fondation et la ou les galeries d'extraction sont les seules parties de l'ouvrage nécessitant l'utilisation de moyens classiques sur un chantier de génie civil. Le reste de la procédure de construction fait appel à une technique tout-à-fait particulière impliquant diverses étapes.

La faible résistance de la structure doit être prise en compte dans la construction des stockages "dôme", particulièrement sous l'aspect prévention et protection de l'explosion. On trouve en France quelques stockages "dôme" pour le stockage de céréales et de sucre.





*Figure 16 - Silo de stockage de type "dôme"*

### **5.2. LES TOURS DE MANUTENTION**

Les tours de manutention sont réalisées pour certaines en béton avec des planchers intermédiaires également en béton avec la technique du coffrage coulissant.

D'autres tours d'élévation sont réalisées avec une ossature en charpente métallique et des parois en bardage. Les tours sont en général équipées sur certaines de leur face de baies d'éclairage.

### **5.3. LES GALERIES DE MANUTENTION**

Les galeries de manutention sont soit aériennes, soit souterraines.

Les galeries souterraines sont réalisées en béton armé. Les galeries aériennes sont réalisées pour certaines en béton armé, pour d'autres en charpente et bardage métallique.

### **5.4. LES POSTES DE RECEPTION**

La réception se fait par route, par fer et par voie fluviale et maritime. La réception des produits approvisionnés par route et par fer se fait dans des fosses de réception. Ces fosses sont équipées d'une grille de séparation pour retenir les corps étrangers les plus importants.

Les produits transportés par bateau sont le plus souvent déchargés au moyen de portiques de déchargement avec transport pneumatique.

### 5.5. LES POSTES D'EXPEDITION

L'expédition se fait par route, par fer et par voie fluviale et maritime. Pour l'expédition des produits en vrac, le chargement des camions et des trains est réalisé au moyen de postes spécialisés de chargement et celui des bateaux au moyen de portiques spécialisés de chargement.

Le transport des produits est le plus généralement de type gravitaire.

Pour l'expédition des produits en sac, les produits en vrac sont stockés en cellules puis conditionnés en sacs ou en big-bag dans des ateliers équipés d'une ou plusieurs lignes d'ensachage.

Les sacs ou les big-bags sont ensuite chargés dans des camions, des trains ou des bateaux.

### 5.6. LES DISPOSITIFS DE TRANSPORT ET DE DISTRIBUTION

#### 5.6.1. LA MANUTENTION

La manutention des grains pour l'ensilage ou pour la reprise des grains stockés, est réalisée le plus souvent gravitairement au moyen de transporteurs et d'élévateurs.

En général, les moyens de manutention verticaux (élévateurs à godets), permettant l'élévation des grains pour la mise en stock, sont groupés dans la tour de manutention qui comprend la majeure partie de l'appareillage du silo et qui en est donc la partie active.

Les circuits de manutention qui assurent le transport des produits depuis les postes de réception et d'expédition jusqu'aux installations de stockage comportent à la fois des transporteurs horizontaux et verticaux.

##### 5.6.1.1. TRANSPORTEURS HORIZONTAUX

On trouve pour ce type de transporteurs :

- **Les transporteurs à chaînes :**

Du fait de leur faible encombrement, ils sont très utilisés en reprise sous les cellules, dans les galeries, dans les fosses de réception. Ils sont fermés, ce qui permet de limiter les dégagements de poussières.

Ils sont généralement légèrement inclinés (jusqu'à 20°). Avec une inclinaison plus importante une chaîne spéciale est nécessaire.

Ils présentent, par rapport aux transporteurs à bande, l'inconvénient d'être souvent bruyants et moins économes en énergie.

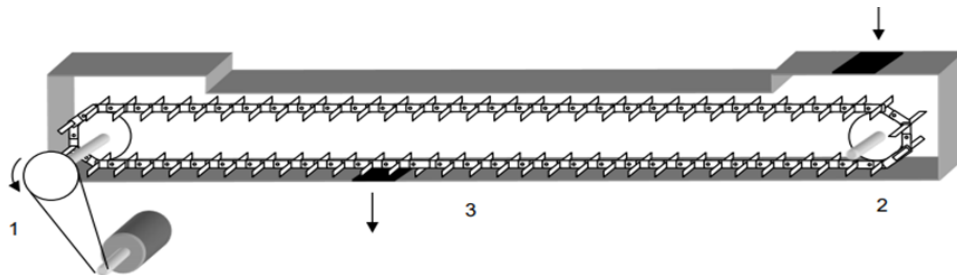


Figure 17 - Schéma de convoyeur à chaîne

- **Les transporteurs à bandes :**

- Ils sont très utilisés pour l'ensilage.
- Ils sont plus encombrants que les transporteurs à chaînes.
- Ils sont recommandés pour les produits fragiles, pouvant se briser lors de la manutention et produire de la poussière.
- Ils sont généralement ouverts, donc susceptibles de provoquer des dégagements de poussières s'ils ne peuvent aussi être capotés.



Figure 18 - Convoyeur à bande

Cet équipement est composé généralement de :

- La bande en caoutchouc.
- Les rouleaux qui soutiennent la bande en produisant un mouvement.
- Le tambour de renvoi.
- Le tambour d'entraînement.
- Motoréducteur relié au tambour avec un arbre.

- **Les transporteurs à vis d'Archimède :**

Ils sont utilisés dans les petites installations de stockage. Leurs débits peuvent atteindre 100 à 150 t/h.

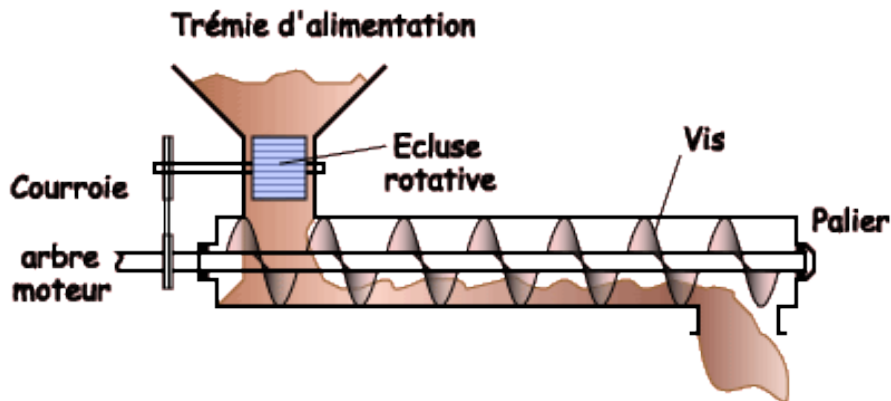


Figure 19 - Convoyeur à vis d'Archimède

### 5.6.1.2. TRANSPORTEURS VERTICAUX

On trouve pour ce type de transporteurs :

- **Les élévateurs à godets :**

L'élévation des grains pour la mise en stock, pour l'expédition ou pour le traitement est réalisée à partir d'élévateurs à godets. Les débits varient suivant les cas de 30 à 1 500 t/h et plus.

Les godets métalliques ou en plastique sont fixés à intervalles réguliers sur une sangle.

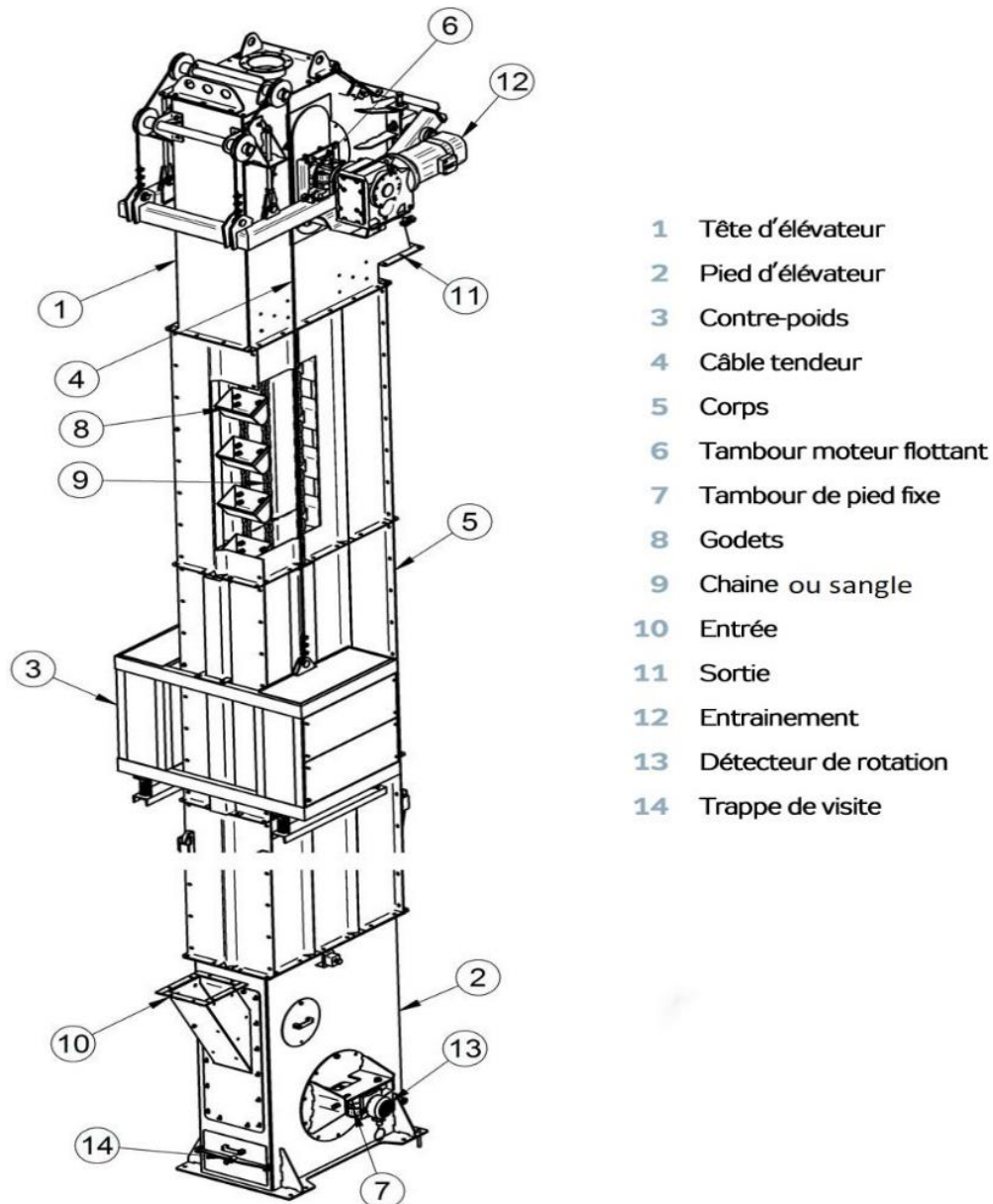


Figure 20 – Schéma d'un élévateur à godets

- **Les vis élévatrices :**

Les vis élévatrices fixes ou mobiles (sur chariots) sont le plus souvent utilisées dans les petites unités de stockage. Leur angle optimum de fonctionnement est de 45° et les débits peuvent atteindre 100 t/h.

Parfois le transport des produits pour l'ensilage ou pour l'expédition est réalisé par un transport pneumatique constitué d'un réseau de tuyauteries.

L'air servant à la manutention des produits est dépoussiéré avant d'être rejeté à l'atmosphère.



### 5.7. L'ENSILAGE DES CELLULES

En général, le circuit d'alimentation des produits à stocker dessert plusieurs cellules et un dispositif de distribution assure la répartition des produits vers les différentes cellules (distributeur rotatif, chariot verseur, ...).

Pour optimiser le chargement des silos plats notamment, des dispositifs particuliers sont utilisés (sauterelle, éjecteur, ...).

### 5.8. LA VIDANGE DES CELLULES

Les techniques de vidange sont de types différents, selon la nature des installations de stockage et les nécessités de rotation. On trouve :

#### 5.8.1. LA VIDANGE GRAVITAIRE :

C'est la solution idéale pour la reprise des grains stockés.

Des dispositions constructives doivent être prises pour donner une pente de 35 à 45° au fond de la cellule afin d'assurer l'écoulement des grains par gravité vers un transporteur.

Les cellules à vidange gravitaire sont systématiquement utilisées pour la réalisation de silos de stockage de transit où le coefficient de rotation des installations est élevé (silos portuaires, stockage de matières premières d'industries utilisatrices, ...). Cette conception des installations de stockage, plus coûteuse en investissement, permet une exploitation au moindre coût.

#### 5.8.2. LA VIDANGE PARTIELLEMENT GRAVITAIRE

Dans le cas des cellules à fond plat ou de magasins de stockage horizontaux, la vidange peut être réalisée partiellement par gravité avec reprise dans une galerie centrale.

L'évacuation du tas résiduel peut être assurée par :

- Une vis rotative de vidange intégrale dans le cas des cellules cylindriques ou par des Trans-racleurs dans le cas de cellules rectangulaires, ramenant les produits vers les orifices de vidange.
- Réalisée en poussant les produits vers la galerie centrale au moyen de chouleurs.

### 5.8.3. LA VIDANGE PAR EXTRACTEUR

Dans le cas de produits pulvérulents stockés dans des cellules à fond plat et s'écoulant donc difficilement par gravité (farines, tourteaux, manioc, ...), on utilise généralement des extracteurs. L'extracteur est constitué d'une vis d'Archimède parcourant la surface du fond de cellule et située dans la masse de produit ;

### 5.8.4. LA VIDANGE PAR FLUIDISATION

Cette technique consiste à utiliser les gaines de ventilation posées sur les silos à fond plat pour fluidiser le tas de produits. Le produit est poussé par la simple action de l'air de ventilation. Il suit les filets d'air orientés vers les orifices de vidange du galerie centrale.

Cette technique permet :

- La suppression de tout élément mécanique de reprise et présente donc l'avantage de ne pas casser les grains,
- L'utilisation des gaines de ventilation pour la vidange.

Elle présente néanmoins l'inconvénient d'une consommation énergétique importante, donc, d'un coût d'exploitation plus élevé que les autres techniques.

Par ailleurs, le dégagement de poussière qu'elle entraîne peut poser des problèmes d'entretien et de sécurité.

### 5.8.5. LA VIDANGE PAR CHOULEUR

Il s'agit d'une vidange demandant l'intervention de l'homme, dans le cas des silos de stockage à fond plat. Le produit est pris dans le tas par un tracteur ou un chouleur et déposé sur une bande transporteuse ou un transporteur à chaîne ou chargé directement sur le système de transport (camion, wagon, ...). Il s'agit du système de manutention le plus simple. Ce type de manutention est économique dans le cas d'installations de stockage dont le taux de rotation annuel est faible.

## 5.9. NETTOYAGE DES PRODUITS

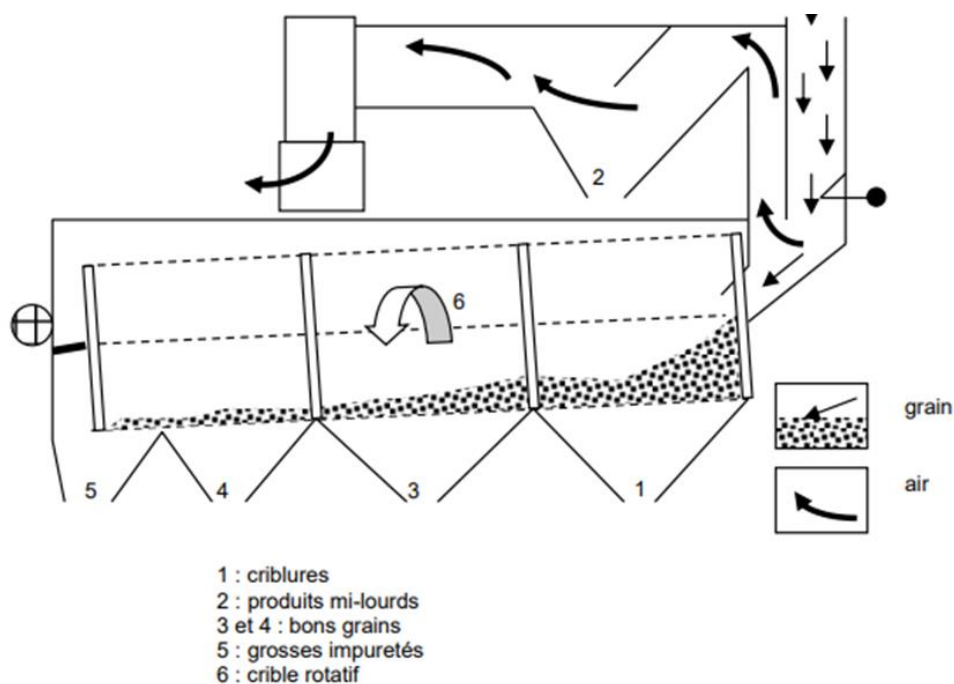
Les produits (grains) avant stockage peuvent être nettoyés. Le nettoyage des produits réalisé dans certains silos est assuré par des installations disposées généralement dans la tour de manutention, alimentée en direct par circuit ou par gravité à partir de boisseaux de stockage. Les opérations de conditionnement plus élaborées telles que le calibrage et l'ébarbage ne sont généralement pas réalisées sur les céréales de consommation. Elles sont par contre nécessaires pour les semences ou les orges de brasserie.

### 5.9.1. LES NETTOYEURS A TAMIS PLAN :

Les plus simples sont équipés d'un tamis plan incliné sur lequel tombe le grain. Ce tamis est animé de vibrations et les grosses impuretés telles les rafles, tiges et feuilles sont retenues. La hotte d'alimentation est parfois reliée à un ventilateur pour obtenir l'aspiration des impuretés légères. Il existe également des appareils à un, deux ou trois tamis. Les tamis sont généralement nettoyés par une brosse.

### 5.9.2. LES NETTOYEURS A TAMIS CYLINDRIQUE

Deux systèmes existent. Dans le premier, le grain tombe sur la partie extérieure du tambour qui est animé d'un mouvement de rotation. Les grosses impuretés sont alors retenues et éliminées. Dans le deuxième système, le grain arrive à l'intérieur du tambour, qui est incliné et est animé d'un mouvement de rotation. Dans les deux cas le tambour peut être animé de secousses axiales ce qui améliore le débit et l'efficacité du nettoyage. Le dégommage du crible est généralement assuré par une brosse rotative.



*Figure 21 - Schéma d'un nettoyeur à tamis cylindrique*

### 5.9.3. LES NETTOYEURS CIRCULAIRES

Ces appareils ainsi que d'autres types qui en sont dérivés (à cascade, etc.) utilisent le principe de la circulation d'un courant d'air en sens inverse du flot de grain ce qui élimine les impuretés légères. Ils ne permettent donc pas l'élimination des impuretés telles que spathes, tiges, rafles et ne doivent être utilisés qu'en complément de nettoyeurs plans ou à tambour.

Ces appareils de nettoyage qui débarrassent les produits des impuretés provenant des matières agro-alimentaires elles-mêmes, et des pierres, peuvent être complétés par des séparateurs magnétiques pour éliminer les corps étrangers métalliques.

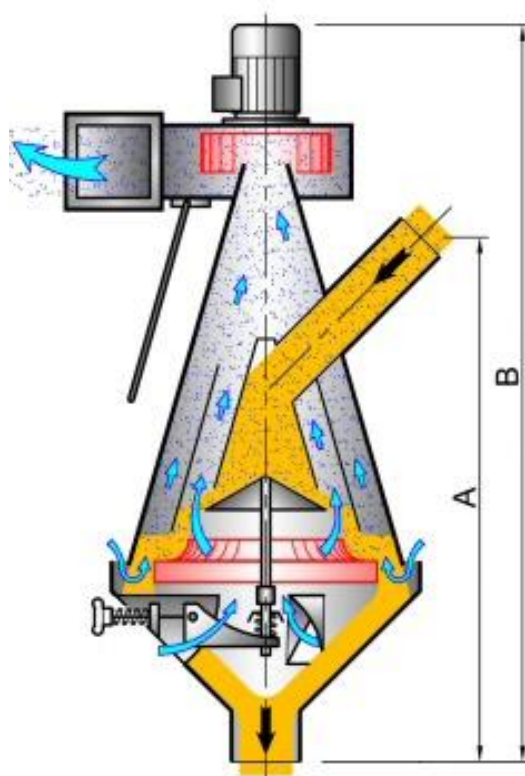


Figure 22 - Schéma d'un nettoyeur circulaire

### 5.10. LA VENTILATION

Généralement, en France, la conservation des grains est réalisée par ventilation au débit moyen de 10 m<sup>3</sup>/h par m<sup>3</sup> de grains. La ventilation se fait aux heures froides et lorsque l'air est sec. On conserve ainsi les stocks par refroidissement. Le refroidissement de l'air de ventilation peut être fait artificiellement au moyen de machines frigorifiques. Pour que la ventilation soit néanmoins efficace, la hauteur de stockage de grains doit être limitée à 20 m environ, sauf dispositions spéciales.

La désinsectisation est réalisée par nébulisation d'insecticide dans le circuit de manutention (en pied d'élévateur généralement) ou par fumigation du produit stocké.

La conservation sous gaz neutre, en atmosphère contrôlée (CO<sub>2</sub>) ou en atmosphère confinée est peu utilisée pour les céréales.

La ventilation est également utilisée pour garder la qualité du sucre stocké en cellules.



Figure 23 - Système de ventilation des silos

### 5.11. LE DEPOUSSIÉRAGE

Pour limiter les émissions de poussières à l'intérieur des bâtiments des silos de stockage en vue de prévenir les risques d'explosion, une captation des poussières est réalisée par aspiration aux points les plus empoussiérés des circuits de préparation et de manutention.

Le dépoussiérage de l'air est réalisé par des filtres à manches ou des cyclones situés le plus souvent dans les tours de manutention.

L'installation de dépoussiérage peut être centrale ou locale.

Les installations de dépoussiérage comportent trois parties distinctes :

- **Une captation des poussières par aspiration par de l'air :**

Pour améliorer l'efficacité de l'aspiration, un capotage le plus étanche possible autour de la source d'émission des poussières est essentiel. Le débit d'air à l'aspiration doit être suffisant pour aspirer les poussières, mais pas trop élevé au risque d'entraîner la matière. La vitesse optimale se situe aux environs de 2 m/s.

- **Un transport de l'air empoussiéré :**

L'air empoussiéré est transporté dans un réseau de tuyauteries. La vitesse de l'air à l'intérieur des tuyauteries doit être la plus constante possible et assez élevée pour limiter les dépôts de poussières susceptibles de colmater les tuyauteries et de s'auto-échauffer.

Cependant, il y a tout intérêt à se limiter à une valeur raisonnable afin de limiter les pertes de charge et d'éviter une usure prématurée des tuyauteries par abrasion. Des vitesses de 15 à 20 m/s permettent de répondre à ce double objectif.



Figure 24 - Aspiration de poussières centralisée sur un convoyeur

- **Une séparation des poussières de l'air :**

Les appareils de séparation les plus couramment utilisés dans les silos de stockage, sont les cyclones et les filtres à média filtrant.

Les cyclones sont les systèmes de séparation de type mécanique utilisant la force centrifuge. Leur efficacité de traitement dépend de la densité des poussières, et également de la vitesse périphérique à l'intérieur de la chambre de séparation.

Lorsque les conditions l'exigent, des filtres à média filtrant sont associés aux cyclones pour limiter les rejets à un seuil acceptable. Ces appareils combinant à la fois un cyclone et un filtre à couche poreuse sont appelés cyclo filtres.

Les séparateurs à média filtrant qui sont aussi utilisés seuls, sont soit des filtres à manches tissus, soit des filtres à manches feutre, soit des filtres à cartouches.



### 5.11.1. NETTOYAGE DES DEPOTS DE POUSSIÈRES

L'enlèvement des dépôts de poussières peut être réalisé manuellement (balais). Mais on rencontre de plus en plus pour cette opération, l'utilisation d'aspirateur industriel, voire de centrale d'aspiration.

La zone d'action des aspirateurs industriels est limitée, ils sont déplacés de bâtiment en bâtiment.

Dans le cas d'une centrale d'aspiration, un réseau de tuyauteries équipé de prises permet de distribuer des points de nettoyage dans les différents bâtiments de l'établissement.

### 5.12. ALIMENTATION EN ENERGIE

L'alimentation en énergie électrique est assurée par des postes de transformation équipés de transformateurs et d'armoires électriques.

On trouve en plus dans certains établissements des compresseurs d'air comprimé et des chaudières pour le chauffage et parfois la production de vapeur ou d'air chaud.

### 5.13. SALLE DE CONTROLE, COMMANDE

Les différents matériels intervenant dans le cycle de travail fonctionnent par asservissement.

Le pilotage des installations est réalisé, selon le niveau de modernité du silo, depuis une salle de contrôle :

- À partir de tableaux synoptiques comportant le diagramme des installations. Dans ce cas, l'établissement des circuits est réalisé à partir de relais électromécaniques,
- À partir d'automates programmables. Cette dernière technique se développe,
- À partir d'appareils donnant des informations sur le fonctionnement des installations.

## 6. ACTIVITES CONNEXES

### 6.1. SECHOIRS

Certaines céréales (maïs, blé tendre, orge, ...) ou oléo-protéagineux (colza, tournesol, pois, soja, ...) nécessitent un séchage pour ramener le taux d'humidité des grains

récoltés à des niveaux compatibles avec leur bonne conservation. Le séchage est réalisé dans des installations spécialisées (séchoirs). De plus en plus, le séchage est réalisé par de l'air chaud chauffé au gaz dans des séchoirs bi-étagés. Ces installations sont munies de dispositifs spéciaux pour économiser l'énergie (récupération de chaleur sur l'air usé, recyclage d'air, refroidissement lent différé, ...). La conduite des installations de séchage est généralement réalisée par automates tenant compte des paramètres de fonctionnement (température de l'air chaud, humidité du grain en sortie du séchoir, degré hygrométrique de l'air usé) pour faciliter l'exploitation et assurer une meilleure sécurité.

Le pilotage des installations de séchage évolue vers une automatisation complète grâce à la mise au point des systèmes de mesure de l'humidité en continu en sortie de séchoir.

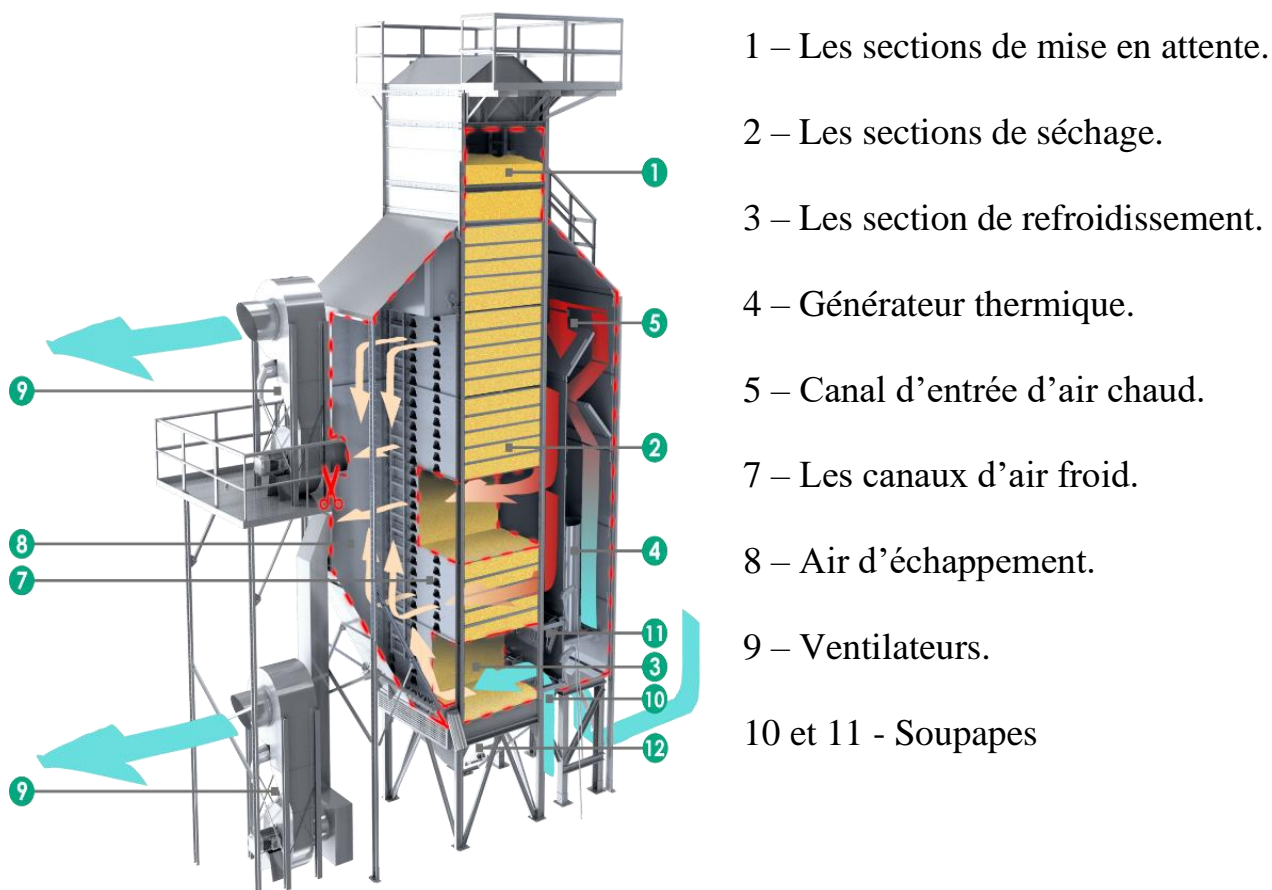


Figure 25 - Schéma d'un séchoir à grain



### 6.2. ATELIERS

Les établissements stockeurs sont équipés généralement d'un atelier dans lequel sont réalisés certains travaux d'entretien (les autres étant réalisés sur place), sur les installations et où sont entreposés les pièces de rechanges et l'outillage nécessaires aux interventions.

Dans les établissements stockeurs, les matériaux combustibles en dehors de produits très spécifiques (produits agro-pharmaceutiques, solvants, ...), sont surtout le gasoil et les huiles utilisés dans les installations (groupe motoréducteur, transformateur), les véhicules (chouleur, camion) et les gaz de soudage et de découpage.

### 7. ACTIVITES ANNEXES

On peut retrouver à l'intérieur des stockages de produits agro-alimentaires, des activités annexes de négoce (qui ne sont pas traitées dans ce guide) qui nécessitent des stockages importants de produits susceptibles de provoquer des incendies voire des explosions.

Il s'agit essentiellement des stockages de produits agro-pharmaceutiques (fongicides, pesticides, insecticides, herbicides) et des stockages d'engrais.

On retrouve parfois pour certains process des produits particuliers (formol, ...) pour lesquels les dangers sont bien spécifiques.

### 8. CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons tout d'abord présenter la réglementation algérienne ainsi la réglementation française liés aux installations de stockage de céréales.

En outre nous avons donné une brève présentation sur les silos de stockage, les différents types de stockage, description de chaque équipement existant dans les organismes de stockage de céréales, son rôle et son principe de fonctionnement, on a aussi expliqué les différentes étapes que les céréales passent par depuis la réception jusqu'à l'expédition.

À partir de cette présentation on peut conclure que l'analyse des risques liés aux silos est difficile en raison du nombre et diversité des paramètres à prendre en compte et dangers liés à chacun de ces équipements.

# **CHAPITRE III : Description du phénomène d'explosion et application de l'arbre de défaillance**

### 1. INTRODUCTION

Le phénomène des explosions de poussières est reconnu depuis le début de l'ère industrielle dans de nombreux domaines, le domaine agroalimentaire en particulier a connu des scénarios d'explosions très grave qui ont contribué à des dégâts matériels et humains, malgré les efforts pour parer ces accidents, leur fréquence est encore très importante et il est communément admis qu'il se produit environ une explosion de poussières par jour en France.

Dans ce cadre, Le présent chapitre sera consacré à l'identification détaillée du phénomène d'explosion de poussière, ainsi que l'accidentologie silo pour comprendre et identifier les facteurs contribuant à l'occurrence du phénomène, En outre dans le cadre d'analyse qualitative et quantitative du risque du phénomène dangereuse nous allons appliquer la méthode d'arbre de défaillance sur notre système pour déterminer les causes et les degrés d'importance et de l'influence de certains événements sur la présence des risques sur le silo agroalimentaire.

### 2. ACCIDENTOLOGIE GENERALE SILO

Nous intéressons à la qualification de tous les facteurs ayant une influence sur la probabilité d'occurrence. Mais pour fixer l'importance des risques, nous allons considérer diverses statistiques générales aux explosions.

Aux États-Unis, ces accidents provoquent plus de victimes et de dommages matériels chaque année que n'importe quel autre type d'explosion industrielle, Le tableau ci-dessous présente l'évolution des explosions de poussières dans l'industrie agro-alimentaire (stockage et transformation) aux Etats-Unis, en termes de fréquence et de conséquences au cours de la période 1977-2000. [32]

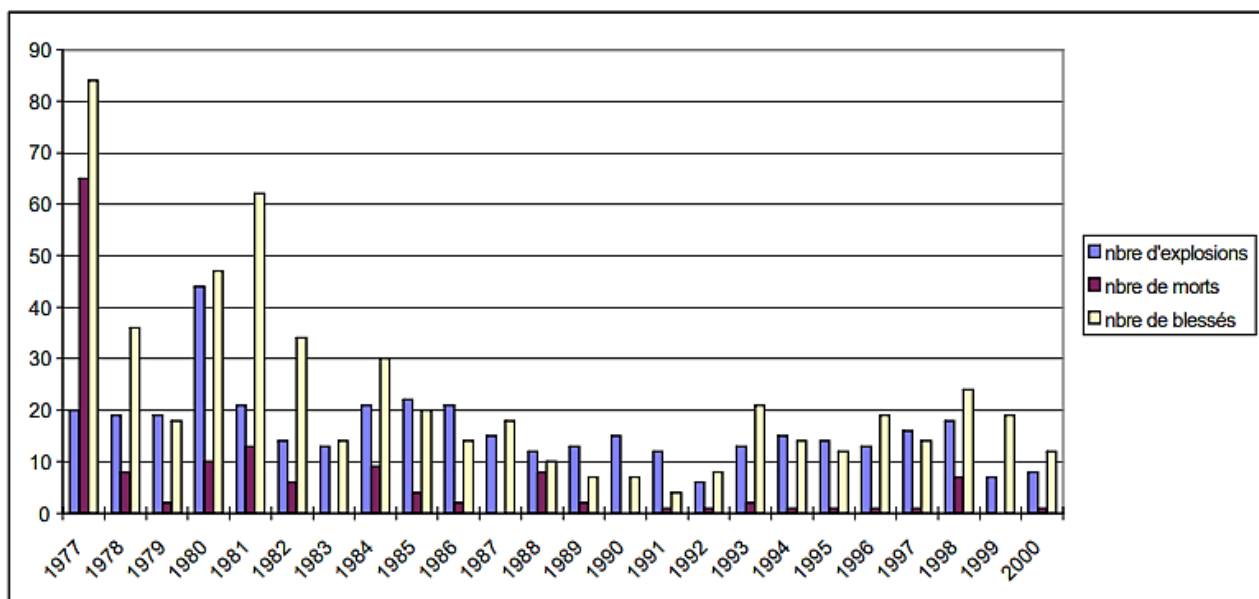


Figure 26 - Les explosions de poussières dans l'industrie agroalimentaire (1977-2000) aux Etats-Unis

Le graphique présenté permet de dégager 2 grandes périodes :

1. **Période 1977-1986** : sur cette période, il a été recensé 214 explosions de poussières de céréales (soit 21 par an). Ces explosions ont engendré 119 morts (soit près de 12 morts par an) et 359 blessés (soit près de 36 par an).
2. **Remarque** : en excluant l'année 1977 qui a connu un mois de décembre particulièrement dramatique (Westego : 36 morts, 15 blessés ; Nouvelle-Orléans : 31 morts, 6 blessés et Galveston : 18 morts et 23 blessés),
3. **Période 1987-2000** : sur cette période, il a été relevé 177 explosions de poussières de céréales (soit 12,6 par an) qui ont eu pour conséquence 26 morts (soit moins de 2 morts par an) et 189 blessés (soit un peu plus de 13 par an).

Jusque dans les années 1980, la France fut relativement épargnée par ce type d'accident et ne prit guère en considération les expériences étrangères, malgré que Le bilan des accidents soit déjà lourd : de 1977 à 1982, huit accidents graves sont recensés dont trois avec victimes (14 morts et 18 blessés). [2]

La prise de conscience ne s'est réellement faite en France que lors de la première explosion majeure d'une malterie à Metz qui a fait 12 morts en 1982. Au total, la France a connu en 13ans 33 accidents graves dont un tiers d'explosions, soit une explosion par an. [2]

Malgré le développement technologique et l'amélioration des mesures de prévention et de protection efficaces, Les accidents ont continué à se produire dans les pays industrialisés jusqu'à ces jours,

Ce graphe ci-dessous montre l'évolution de nombre d'explosion ces derniers années [33]

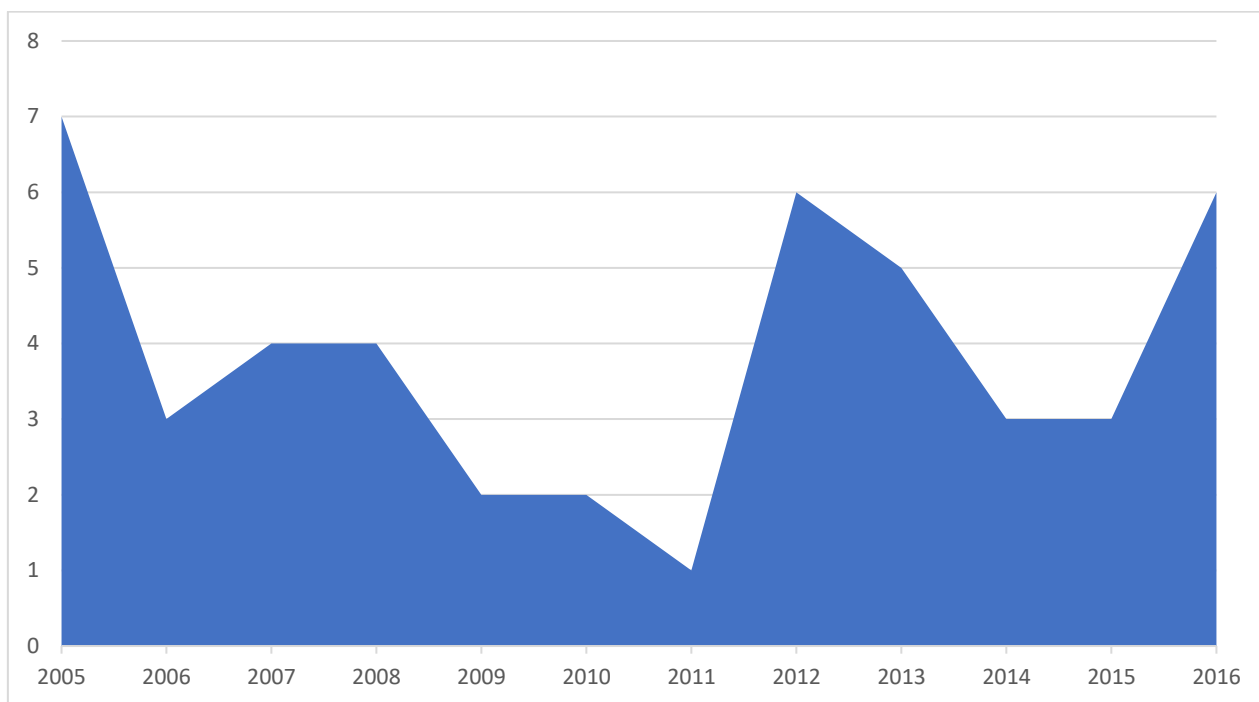


Figure 27 - Nombre d'accidents annuels impliquant des silos ayant générés une explosion

### 2.1. ACCIDENTS MARQUANTS

#### 1. Explosion d'un site meunier à Strasbourg

Le 10 avril 1991, une explosion se produit dans un site meunier à Strasbourg.

Les effets de pression constatés sont importants dans le bâtiment abritant les cellules de stockage farine, son, semoule et dans cinq cellules de stockage.

C'est vraisemblablement dans une de ces cellules au cours de la visite d'un employé que l'explosion a démarré. L'explosion s'est ensuite propagée dans d'autres parties du site (moulins, bâtiment d'ensachage), avec cependant des effets de pression moindres.

L'accident a détruit une partie des installations du site meunier, et le bilan humain s'établit à un mort et deux blessés.

### 2. Explosion d'un silo de céréales à Blaye

Le 20 août 1997, une explosion se produit dans un silo de céréales à Blaye alors que diverses opérations de manutention (maïs, blé, orge) sont en cours.

Le bilan de l'accident s'établit à 11 morts, dont 10 retrouvés dans les locaux administratifs et techniques implantés au pied du silo ou à proximité immédiate de ceux-ci, et 1 blessé.

De façon générale, le silo vertical s'est effondré en partie centrale et en partie nord. Sur les 44 cellules, seules 16 semblaient encore en grande partie en place après le sinistre.

La tour de manutention, ainsi que les cellules immédiatement adjacentes, ont été presque totalement détruites. Des équipements de l'installation, notamment des éléments du circuit centralisé de dépoussiérage, n'ont pas été retrouvés. Des dommages aux habitations, notamment des bris de vitres, ont été recensés jusqu'à une distance de l'ordre de 500 mètres du silo.

### 3. Explosion d'un silo de céréales à Floriffoux

Le 7 avril 1993, l'explosion d'un silo à Floriffoux en Belgique, tue cinq personnes et en blesse quatre.

Une panne du système automatisé rendait impossible un nettoyage général du bâtiment central, utilisé pour le traitement des céréales. A la place, les ouvriers avaient commencé le nettoyage par le cinquième étage en précipitant les poussières et résidus d'étages en étages, créant ainsi un véritable nuage de poussières qui s'infiltrait dans l'ensemble des locaux. Peu avant le sinistre, trois opérations étaient effectuées simultanément.

- Le chargement de 600 tonnes de céréales à bord d'une péniche. Ces céréales, assez sèches.
- Des céréales ne pouvaient s'écouler d'un silo et une opération de désengorgement était en cours. Pour l'entreprendre, il était d'abord nécessaire de découper, à l'aide d'une disqueuse.
- Dans le même temps une "rustine" était découpée au chalumeau pour désengorger une cellule de stockage par le bas.

L'explosion a démarré dans le caniveau où l'on procédait à cette découpe. Elle s'est propagée avec violence dans les sous-sols situés sous les silos jusqu'à la tour de manutention. Des éboulements de parois, de planchers et d'installations diverses causèrent alors aux victimes, en plus des brûlures, de multiples contusions.

### **2.2. CAUSES D'ACCIDENTS**

L'expérience acquise repose sur l'analyse détaillée d'accidents dans trois pays (France, Pologne, République Tchèque). Sur une période de 30 ans, plus de 100 accidents ont été analysés de façon détaillée

En prenant aussi en considération des accidents dans divers autres pays, il a été possible de tirer les conclusions générales suivantes.

#### **2.2.1. AGE DES INSTALLATIONS**

Des incendies et des explosions se sont produits aussi bien dans des installations neuves qu'anciennes. Dans certains cas, l'accident est arrivé dans la phase de mise en route et pouvait être attribué à l'absence d'une appréciation détaillée du risque mettant suffisamment l'accent sur les et de protection.

#### **2.2.2. TRAVAUX DE MAINTENANCE ET DE REPARATION**

Dans de nombreux cas, les travaux de maintenance et de réparation étaient à l'origine des accidents ; il faut souligner l'importance d'adopter la procédure d'autorisation de travail par point chaud toutes les fois où des travaux de soudure et de découpage doivent être entrepris.

#### **2.2.3. NATURE DES PRODUITS MIS EN CAUSE**

Des types très différents de produits étaient impliqués dans les accidents : céréales, fourrages, protéagineux et oléagineux, lait en poudre, sucre. Tous ces produits sont combustibles, mais leur inflammabilité, leur combustibilité et leur explosivité, la propagation de l'incendie et de l'explosion sont largement fonction de leurs propriétés physiques telles que la teneur en eau et en cendres, la granulométrie, l'âge... Ces propriétés ont une influence plus ou moins grande selon les appareils utilisés pour leur fabrication. Des procédures opérationnelles inadaptées telles que des températures trop élevées, des débits trop importants, des produits trop humides, des broyages trop fins peuvent introduire des conditions facilitant l'inflammation par exemple.

### 2.2.4. SOURCES D'INFLAMMATION

Avant stockage, les produits sont manipulés dans des appareils mécaniques, tels que des bandes transporteuses, des élévateurs à godets, des mélangeurs, des nettoyeurs, des broyeurs dans lesquels des frottements sont difficilement évitables. Beaucoup d'accidents mettent en cause les élévateurs à godets du fait de frottement.

Les processus de séchage sont aussi mentionnés dans de nombreux accidents ; ceci est la conséquence de températures trop élevées et/ou de temps de séchage trop longs. L'inflammation se produit dans le séchoir lui-même ou dans le stockage qui lui est relié dans lequel des produits trop chauds sont réceptionnés.

L'auto-échauffement et l'auto-inflammation de couches de poussières sur des surfaces chaudes sont aussi connues pour avoir entraîné aussi bien des incendies que des explosions.

Un nombre non négligeable d'accidents est la conséquence d'opérations de soudure et de découpage ou a pour origine des installations électriques.

Des accidents attribués à des inflammations par étincelles électriques ou électrostatiques sont mentionnés dans le cas de poussières possédant des énergies très faibles d'inflammation (amidon séché et sucre).

### 2.2.5. FONCTIONNEMENT DE L'INSTALLATION

De nombreux accidents sont survenus lors des opérations de démarrage et d'arrêt pour lesquelles des nuages de poussières ou des dépôts de poussières importants se produisent. Ceci concerne tout spécialement les opérations de remplissage et de vidange des cellules. Par ailleurs, lorsqu'on change de produit dans une même installation, les réglages ne sont pas toujours réalisés ; des incendies et des explosions sont connus lors du séchage de lait à diverses teneurs en matières grasses, lors de la manipulation de grains plus secs qu'à l'ordinaire, lors du séchage de grains.

### 2.2.6. TYPES DE BATIMENTS ET EQUIPEMENTS DIVERS

Dans de nombreux cas, les cellules de stockage, les galeries aériennes ou souterraines, et les bâtiments en général étaient construits de telle manière que, lors de l'explosion, des débris étaient projetés, parfois à plusieurs centaines de mètres. L'analyse des accidents montre aussi l'effondrement plus ou moins généralisé de l'ensemble du silo,



notamment en raison de l'absence de prise en compte des explosions secondaires dans ces installations.

### 2.2.7. MATERIELS UTILISES POUR RECUPERER LES POUSSIÈRES

Le matériel dans lequel la poussière est récupérée, principalement comme sous-produit a été impliqué dans diverses explosions. Une appréciation précise du risque doit être faite lorsqu'on prend la décision d'installer de tels équipements dans une installation, principalement pour des raisons économiques ou d'hygiène.

### 2.2.8. AUTOMATISATION DES INSTALLATIONS

Lorsqu'on augmente l'automatisation des installations, il est encore plus indispensable lors de l'analyse de risque de définir des limites de fonctionnement sûr. Une attention particulière est à accorder à la surveillance des propriétés physiques des produits et au contrôle de fonctionnement des équipements, tout spécialement à la température. La détection précoce des frictions et bourrages dans les équipements est indispensable.

### 2.2.9. FACTEUR HUMAIN

Lorsqu'il a été possible de discuter avec les personnes directement impliquées dans le fonctionnement d'une installation accidentée, il a pu être constaté que souvent les opérateurs n'étaient pas avertis des conséquences possibles de tels incendies et explosions et ont été surpris par la rapidité de développement du phénomène.

## 3. DESCRIPTION DU PHENOMENE D'EXPLOSION

### 3.1. DEFINITIONS

#### 3.1.1. EXPLOSION

Une **explosion** résulte d'une brusque libération dans l'air de substances inflammables sous forme de gaz, vapeurs ou poussières. Après inflammation du mélange gaz/air, la combustion se propage à l'ensemble du mélange non brûlé.

#### 3.1.2. POUSSIÈRES

« Les poussières sont de petites particules solides qui se déposent sous l'effet de son poids mais qui peuvent rester en suspension dans l'air pendant un certain temps. » [34]

« Particules très fines qui se détachent de matériaux divers sous l'effet de chocs ou de déflagrations : Poussières industrielles. (Les poussières produites dans diverses

industries peuvent provoquer un certain nombre de maladies, (...). Particules diverses qui s'accumulent sur les objets, et constituent un élément de saleté (...). » [35]

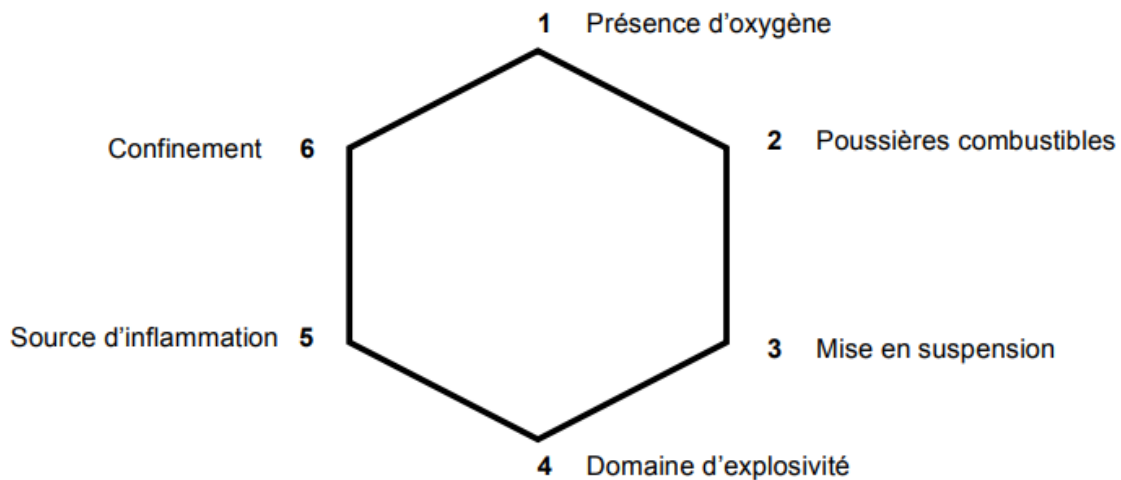


Figure 28 - Hexagone de l'explosion

D'après ces définitions et les éléments disponibles dans la littérature, on peut définir une explosion de poussières comme une transformation chimique exo énergétique (combustion explosive des fines particules en suspension) au cours de laquelle il y a émission d'une onde de pression (quasi exclusivement subsonique), associée à divers flux de matières (missiles, effondrement de structure, fragments de vitres, polluants) et d'énergie (thermique).

#### 4. CONDITIONS NECESSAIRES DU PHENOMENE

Ces 6 conditions réunies constituent l'hexagone de l'explosion. Nous allons aborder chacune des six conditions à réunir décrites ci-dessous [36] :

##### 4.1. POUSSIÈRES COMBUSTIBLES

Une importante fraction de la poussière est combustible, l'autre partie étant constituée de matières minérales (sels, terre)

##### 4.2. PRESENCE D'OXYGÈNE

La quantité d'oxygène présente dans l'atmosphère où se déroule la combustion doit être suffisante pour permettre cette combustion. Il a été constaté que lorsque la teneur en oxygène dans le nuage est inférieure à une valeur critique (8-10% pour la plupart des organiques), l'explosion ne peut pas se développer.

### 4.3. MISE EN SUSPENSION :

Les particules doivent pouvoir être mises en suspension et s'y maintenir un temps suffisant pour que l'explosion puisse se développer.

La taille des particules est importante car au-delà d'un diamètre moyen de 300-400  $\mu\text{m}$ , la vitesse de sédimentation après mise en suspension est au moins égale à la vitesse de propagation de la combustion dans sa phase initiale, le nuage s'effondre et l'explosion « étouffe » d'elle-même

### 4.4. DOMAINE D'EXPLOSIVITE

La quantité de particules en suspension doit permettre la propagation de l'explosion d'une particule à l'autre. Lorsque le mélange est trop « dense », l'oxygène n'est pas présent en quantité suffisante dans le mélange air / particules en suspension pour assurer la propagation de la combustion. Lorsque le mélange est trop « dilué », les particules sont trop éloignées les unes des autres pour favoriser une propagation rapide et le développement de la combustion.

### 4.5. CONFINEMENT :

La présence d'un confinement est nécessaire pour que puissent se manifester les effets de l'explosion de poussières.

Dans le cas des silos il est réalisé en général par le bâtiment (galeries desservant les silos), les parois du stockage (silos notamment) ou de l'organe de transport (élévateur).

### 4.6. SOURCES D'INFLAMMATION :

Généralement, le déclenchement de l'explosion, nécessite un apport d'énergie complémentaire.

L'énergie permettant d'obtenir la combustion est apportée par les sources d'inflammation qui proviennent de phénomènes biologiques, physiques, électriques ou mécaniques.

Les sources d'inflammations possibles sont indiquées ci-après. [37]

#### 4.6.1. SURFACES CHAUDES :

Si une atmosphère explosive vient en contact avec une surface chauffée, l'inflammation peut se produire Les surfaces chaudes peuvent provenir des installations

électriques (moteurs, coffrets d'alimentation, câbles), des conduites de chauffage, des paliers de machines, des frottements de pièces l'une sur une autre.

Il arrive aussi que des dépôts chauds se détachent et se trouvent transportés dans d'autres endroits des installations où ils peuvent donner lieu à des inflammations.

### 4.6.2. MATERIEL ELECTRIQUE

Dans le cas du matériel électrique, des étincelles électriques et des surfaces chauffées peuvent être produites et constituer des sources d'inflammation. Les étincelles électriques peuvent être produites par exemple :

- Lorsque des circuits électriques sont ouverts ou fermés,
- Ou du fait de connexions desserrées.
- Ou par suite de courants vagabonds :
  - Par suite de l'induction magnétique, par exemple près des installations électriques où existent des courants et des radio fréquences élevées.
  - En raison d'un court-circuit, par suite de défauts dans les installations électriques.
  - Sous forme de courants de retour dans les installations de génération de puissance.

### 4.6.3. ÉLECTRICITE STATIQUE

Dans certaines conditions, des décharges d'électricité statique capables de conduire à des inflammations peuvent se produire. La décharge de parties conductrices isolées et chargées peut facilement conduire à des étincelles capables de donner l'inflammation.

De façon générale, il existe quatre types de décharges, qui sont données ci-dessous par ordre croissant d'énergie dégagée :

- La décharge “ en aigrette ” qui se rapporte à la décharge d'une surface isolante vers un objet conducteur, décharges de surfaces isolantes chargées par frottement, de manière continue (courroie de machine par exemple)
- La décharge “ cône ” qui est une décharge de talus. Elle peut avoir une énergie qui dépend de la taille du silo, de la granulométrie, du débit de remplissage. Par exemple elle se produit lors du remplissage de silos ou de conteneurs de grandes dimensions

- La décharge “ étincelle ” qui correspond à une décharge entre deux conducteurs dont un est isolé, un exemple comme un tambour sur une surface isolante qui se charge lors du remplissage d'un produit.
- La décharge glissante de surface qui se produit à la surface de matière isolante mince recouvrant des supports conducteurs mis à la terre (transport pneumatique des poudres à grande vitesse à travers une conduite isolée ou une conduite à revêtement interne isolant, remplissage de grands silos par exemple.)

#### **4.6.4. AUTO-ECHAUFFEMENT**

Le risque d'auto-échauffement peut exister chaque fois qu'une masse importante de produit peut subir des phénomènes de fermentation et/ou d'oxydation, Le phénomène d'oxydation se

Produira d'autant mieux lorsque le produit est chauffé dans les processus de broyage, séchage cependant la fermentation se produira d'autant mieux lorsque les grains stockés sont humides

#### **4.6.5. ÉTINCELLES D'ORIGINE MECANIQUE**

Ils se produisent dans des appareils mécaniques, tels que des bandes transporteuses, des élévateurs à godets, des mélangeurs, des nettoyeurs, des broyeurs du fait de frottement.

#### **4.6.6. TRAVAUX PAR POINT CHAUD**

Les travaux comme les soudures, découpage à la disqueuse et au chalumeau fait dans différents appareils de silo tel que les élévateurs, les bandes transporteuses ou la tour de manutention

### **5. DEROULEMENT D'EXPLOSION POUSSIÈRES**

#### **5.1. ALLUMAGE**

Il est nécessaire d'avoir un échauffement des particules, soit par un point chaud en contact avec le nuage de poussières, soit par rayonnement à partir d'une source éloignée. Les particules soumises à l'échauffement s'enflamment et brûlent en libérant une grande quantité d'énergie.

Les sources d'inflammation en fonctionnement normal ou lors d'un dysfonctionnement sont décrites précédemment (sources d'inflammation d'explosion) [36]

### 5.2. PROPAGATION

Ces particules en combustion (de 1000 à 2000°C) servent à leur tour de « source d'inflammation » pour les particules proches, de sorte que la flamme (la zone de combustion) se propage de proche en proche. Sur son passage, la flamme transforme le milieu « froid » en produits de combustion « chauds ». Le volume concerné passe de 20°C à 1000-2000°C en peu de temps. Ce volume subit donc une expansion thermique très importante

### 5.3. EXPLOSION :

Dans le cas des explosions de poussière, si l'expansion thermique se réalise dans une enceinte close, la pression interne augmente. Lorsque l'équipement soumis à la surpression est suffisamment résistant, celle-ci peut atteindre des valeurs de l'ordre de 100 bars (Conditions particulières). Lorsque le seuil de résistance mécanique est atteint, la structure éclate : c'est l'effondrement de la structure, conséquence grave des effets de surpression.

## 6. MESURES PREVENTIVES DES EXPLOSIONS DE POUSSIÈRES DANS LES INSTALLATIONS AGRICOLES (SELON LA NORME NFPA 61)

### 6.1. DISPOSITIONS CONSTRUCTIVES

Parmi ces dispositions constructives, on y retrouve la recommandation de tenir à distance les locaux abritant du personnel non opérationnel. Une distance d'éloignement de 30 mètres est retenue dans le cas des silos en béton. Cette distance peut être réduite à 15 mètres dans des cas particuliers (élévateurs à godets extérieurs, élévateur à godets protégés par un système de suppression des explosions). Enfin, ces locaux ne doivent en aucun cas se trouver au-dessus de galeries souterraines dans lesquelles sont transportées le grain.

Afin de maîtriser la présence de combustible dans les locaux (maîtrise des explosions secondaires), il est demandé de limiter les surfaces horizontales et de promouvoir les revêtements muraux qui ne soient pas de nature à accrocher la poussière.

### 6.2. VENTILATION DE L'ATMOSPHERE

Les systèmes de recyclage de l'air doivent être équipés de filtres à poussières dans les zones où existe un risque d'explosion de poussières. Les cellules doivent être ventilées afin d'en extraire les poussières lorsqu'il est procédé aux opérations de vidange et de

remplissage. L'air extrait ne doit pas être réintroduit dans le bâtiment à moins qu'il ait été efficacement épuré de sa poussière

### **6.3. PREVENTION DES EXPLOSIONS, EVENTS ET SURFACES SOUFLABLES**

On y retrouve la recommandation d'avoir recours à des surfaces soufflables et aux événements afin de protéger les lieux dans lesquels existe un risque d'explosion de poussières. Cette disposition prend effet dans la limite des contraintes inhérentes à l'installation. Ces surfaces de décharge ne doivent pas pouvoir se refermer après ouverture et doivent demeurer solidaire au bâti après ouverture.

#### **6.3.1. LES EQUIPEMENTS DE TRAVAIL**

- Il est d'abord question des roulements à billes. Ceux-ci doivent être de type à limiter les frottements.
- Ils doivent être entretenus selon les recommandations du fabricant sans pour autant être lubrifiés de manière excessive.
- Ils doivent être libres de tous dépôts de poussières. En outre, les roulements des convoyeurs et des élévateurs doivent être situés à l'extérieur du bâti et isolés des flux de matière.

#### **6.3.2. LES CONVOYEURS**

- Les courroies de transmission quant à elles doivent être conductrices de l'électricité.
- Les dispositifs de convoyage doivent être équipés de dispositifs d'arrêt automatique en cas de bourrage ou bien de systèmes de débouillage.
- En outre ils doivent être cloisonnés dans des caissons métalliques.
- Une résistivité limite est fixée pour les bandes transporteuses qui doivent par ailleurs être résistantes à l'huile et au feu.

#### **6.3.3. DES ELEVATEURS A GODETS**

- Les éléments de ces installations doivent être le plus étanches possibles à la poussière.
- Des matériaux non-combustibles doivent être utilisés pour leur fabrication.
- Des accès doivent être prévus au pied et à la tête de l'élévateur afin de le nettoyer et de contrôler l'alignement de la bande.

- La performance de la motorisation de l'élèveateur est également passée en revue.
- Une réduction de la vitesse de la courroie (perte de vitesse de 20%) doit déclencher une alarme. Dans certains cas, il est également demandé de suivre le niveau vibratoire et le niveau de température des roulements.

### **6.3.4. LES SECHOIRS A GRAIN.**

- L'accumulation de matière combustible doit être évitée.
- L'implantation des séchoirs est soumise à des règles d'éloignement. Ils doivent être en matériaux non-combustibles.
- Enfin, il existe toute une série de dispositions relatives au système de chauffage de l'air, aux boucles de contrôles de sécurité, aux systèmes de protection et de détection, au contrôle des sources d'ignition, aux systèmes de suppression et d'extinction, et enfin aux contrôles et aux inspections auxquelles doit être soumis le séchoir.

### **6.3.5. LE CONTROLE DE L'EMPOUSSIEREMENT**

- La poussière présente sur le sol doit être régulièrement nettoyée.
- L'usage d'air comprimé pour procéder au nettoyage n'est pas recommandé.
- Le retour de la poussière dans le procédé doit se faire en aval du point de collecte et ne doit pas générer un nuage de poussières. Tout en respectant la règle précédente
- Les ventilateurs utilisés pour le transport de la poussière doivent être adaptés à la zone d'usage
- Les systèmes de dépoussiérage doivent être situés à l'extérieur des bâtiments et doivent être protégés.
- Les équipements de stockage de la poussière de grain doivent être non combustibles et étanches à la poussière. En outre, ils doivent être situés à l'extérieur du bâtiment
- Les systèmes de dépoussiérage doivent être en fonctionnement avant la mise en route des équipements de travail.
- L'arrêt intempestif d'un système de collecte des poussières doit déclencher une alarme.



### 6.3.6. AUTRES EQUIPEMENTS DE TRAVAIL, AUTRES REGLES

- Des systèmes destinés à retirer les débris présents dans le grain (aimants, grilles...) doivent se trouver en amont de l'élévateur
- Les équipements de travail doivent être reliés à la terre.
- Tous les équipements doivent être conçus de manière à en faciliter le nettoyage.
- Les vis transporteuses et autres convoyeurs doivent être cloisonnés et doivent disposer de systèmes d'arrêt en cas de bourrage
- Les canalisations doivent être en métal. Les plastiques conducteurs sont tolérés.

## SECTION II : PARTIE PRATIQUE

### 1. CRITERE DE CHOIX DE SCENARIO

Dans le cadre de cette étude qui est sur l'explosion du silo, nous avons porté dans la partie pratique notre attention tout particulièrement sur **L'explosion d'élévateur à godet**, nous avons choisi spécifiquement cet équipement parmi les autres équipements qui composent le silo pour des plusieurs raisons.

Les explosions les plus graves et les plus fréquentes semblent survenir dans les élévateurs à grains où se font les manipulations de chargement des silos. Les vitesses de déplacement et de remplissage dans les élévateurs peuvent atteindre 1 000 tonnes par heure. Ces manipulations s'accompagnent d'importants dégagements de poussière cela explique que les accidents surviennent fréquemment à partir des élévateurs de grande capacité, mais ils touchent également les cellules des silos. [2]

Tout ce qui est mentionné ci-dessus est suivant le retour d'expérience à propre d'explosion des silos agroalimentaire.

Une étude réalisée par la NFPA entre 1958 et 1978 sur 250 explosions a permis d'identifier et de classer les équipements qui sont le siège d'explosions primaires dans l'industrie agroalimentaire [32]

Le graphe ci-dessous montre les résultats de l'étude

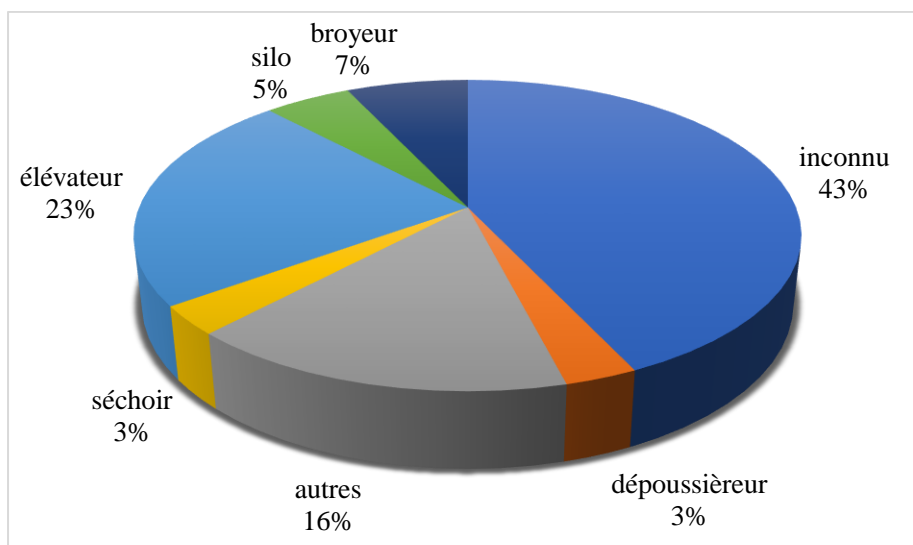


Figure 29 - Les appareils où se produisent des explosions de poussières dans l'industrie l'agro-alimentaire aux États-Unis

Ces données confirment que les élévateurs sont le plus souvent impliqués dans les explosions primaires (près d'1 explosion sur 4) et ce avec une fréquence 3 fois plus élevée que tout autre appareil.

Une autre Localisation des explosions primaires a été fait sur la décennie 1990-1999, Au cours de cette période qui a connu 129 explosions, la localisation de l'explosion primaire a pu être proposée dans 93% des cas. [32]

Localisation de l'explosion primaire	Part dans les appareils identifiées (%)
Élévateur à godet	48
Trémie	15
Filtres poussières	5
Système de dépoussiérage	4
Broyeur	5
Silo	4
Autres	10

Tableau 7 - Les appareils où se produisent des explosions dans l'industrie l'agro-alimentaire 1990-1999

En dépit des enseignements tirés de la période précédente et de mesures de prévention spécifiques aux élévateurs à godets insérés, on constate que les élévateurs à godets demeurent très souvent le point de départ des explosions.

Autre localisation d'explosion primaires dans l'industrie agroalimentaire été fait en 2000, les résultats étaient : Sur un total de 8 explosions, 3 ont pris naissance dans

l'élévateur. Outre 2 explosions dont l'origine est indéterminée, les autres équipements incriminés sont un séchoir, un broyeur et un système de pesage. [32]

### 2. EXPLOITATION DE REX :

#### 2.1. DEFINITION DE REX :

Le retour d'expérience est une démarche qui consiste à collecter et analyser les informations utiles afin de déterminer les circonstances et les causes certaines ou possibles de l'événement de l'accident, ou de l'incident, dont l'objectif est de prévenir de futurs événements, accidents ou incidents, et, s'il y a lieu, d'établir des recommandations de sécurité. [38]

#### 2.2. RETOUR D'EXPERIENCE SUR LES ACCIDENTS IMPLIQUANTS DES EXPLOSIONS D'ELEVATEURS A GODETS

Les céréales constituent la base de l'alimentation d'une grande partie de la population mondiale et utilisés dans diverses industries agroalimentaires donc ils ont beaucoup de bénéfices.

En revanche, les poussières d'origine d'agroalimentaire et de céréales explosions présentent une cause principale d'accidents d'explosions plus meurtrières que les autres types de produits dans ses installations (les silos), On peut citer des accidents marquants comme catastrophe de METZ en France, celle de Westego aux USA (1977)

Cette partie présente quelques accidents ayant conduit à des **explosions d'élévateur à godet**, et contenant des informations exploitables sur l'événement initiateur. Les résultats de l'interrogation de la base de données ARIA1 du BARPI.

Dans le tableau suivant on a analysé les accidents et résumé les résultats

Référence	Lieu & Date	Description de l'accident	Causes	Conséquences matériels et humaines
ARIA 12901	Beaumont-De-Lomagne (France) 13/05/1998	Une explosion survient dans une des trémies de 150 t, contenant 20 t de sorgho. Elle a été initiée par des particules incandescentes résultant de frottements à la suite de la détérioration d'un roulement de l'un des paliers de l'axe de la poulie d'un élévateur à godet. La trappe de visite en partie	Explosion initiée par des particules incandescentes résultant de frottements à la suite de la détérioration d'un roulement de l'un des paliers de	Explosion d'une des trémies de 150 t. La grille de sécurité a été projetée à 20 m de l'installation.

## CHAPITRE III : Description du phénomène d'explosion et AdD.

		supérieure a servi d'évent d'explosion et a limité les dégâts matériels	l'axe de la poulie d'un élévateur à godet.	
ARIA 20340	ALBERT (France) 14/05/2001	Fabrication d'aliments pour animaux lors d'une opération d'ensilage de tourteaux de colza, une explosion se produit dans la jambe de retour d'un élévateur à godets d'un silo horizontal alors que des travaux de maintenance sont en cours, Des explosions secondaires se produisent dans l'élévateur et dans la zone de stockage attenante	Travaux par Point chaud (meulage et soudure) sur équipement en marche	- 1 mort - 1 blessé - L'explosion a soufflé la toiture du silo sur la moitié de sa surface et éventré les parois de la tour de manutention
ARIA 47633	BOUCAU (France) 26/01/2016	Une explosion se produit au niveau du pied de l'élévateur d'un silo portuaire en cours de chargement. Cette explosion entraîne deux autres explosions. Une explosion se situe dans le filtre du dépoussiéreur due aux particules incandescentes aspirées. Une autre a lieu dans les étages de la tour de manutention, C'est un opérateur préposé au chargement des navires qui donne l'alerte suite à l'arrêt de l'approvisionnement en céréales. Les techniciens d'exploitation constatent alors un défaut sur la sécurité relative à l'intensité	-L'effondrement de la poulie de la sangle. Celui-ci a entraîné le basculement du tambour qui, en continuant à tourner, a frotté la tôle de carénage jusqu'à sa fusion  -Le contrôleur de rotation défaillant	Quelques manches ont brûlé
ARIA 51118	GRANDE SYNTHE (France) 23/02/2018	Une explosion de poussière survient au niveau d'un élévateur d'un silo portuaire, la manutention tournait à vide. Le convoyeur situé entre le silo plat et la galerie sous-cellule de 8 cellules béton, aurait transporté des braises. Celles-ci auraient été déversées dans l'élévateur à godet qui a explosé. La galerie se situe au niveau du sol. L'explosion a eu lieu au niveau de l'élévateur dans la tour de manutention de ces cellules béton et dans la galerie sous-cellule	Effondrement puis échauffement du pallier en tête du convoyeur, l'effondrement du pallier peut-être dû, soit à un défaut de graissage, soit à une casse du rouleau  - Accumulation suffisante de poussière dans pied d'élévateur	- Les 16 surfaces soufflables de la galerie sont projetées à plus de 50 m  - De nombreux éléments de structures métalliques du côté fermé sont déformés  - Un employé est légèrement blessé

*Tableau 8 - Résultat obtenue du retour d'expérience des accidents des silos agro-alimentaire*

Dans le cadre d'analyse quantitative du risque d'explosion d'élévateur à godet, les techniques d'analyse par arbre de défaillance sont généralement utilisées. L'AdD est une méthode type déductif.

En effet, il s'agit, à partir d'un événement redouté défini a priori, de déterminer les enchaînements d'évènements ou combinaisons d'évènements pouvant finalement conduire à cet événement.

### **3. ARBRE DE DEFAILLANCE D'EXPLOSION D'ELEVATEUR A GODET PAR LOGICIEL ARBRE ANALYSTE WIN2-3-2 :**

### **4. JUSTIFICATION DE CHOIX DE LA METHODE ARBRE DE DEFAILLANCE :**

L'analyse par arbre de défaillances est la plus couramment utilisée dans le cadre d'études de fiabilité, de disponibilité ou de sécurité des systèmes. Elle présente en effet un certain nombre d'avantages non négligeables par rapport aux autres méthodes.

La méthode Arbre de Défaillance a été choisi comme étant notre méthode d'analyse des risques pour les intérêts suivants :

1. Son aspect graphique tout d'abord, caractéristique particulièrement importante, constitue un moyen efficace de représentation de la logique de combinaison des défaillances. Il participe largement à la facilité de mise en œuvre de la méthode et à la compréhension du modèle.
2. Le processus de construction de l'arbre basé sur une méthode déductive permet à l'analyste de se focaliser uniquement sur les événements contribuant à l'apparition de l'événement redouté.
3. Par opposition aux méthodes de simulation, l'approche analytique offerte par l'arbre de défaillances a l'avantage de pouvoir réaliser des calculs rapides et exacts.
4. La méthode permet d'estimer la probabilité non seulement de l'événement redouté, mais aussi celle des portes intermédiaires, à partir de celle des événements de base. Il est également possible de faire de la propagation d'incertitudes sur les données d'entrée, et du calcul de facteurs d'importance.

**4.1. CONSTRUCTION DE L'ARBRE :**

Après l'identification des évènements d'après les accidents des retours d'expériences, on passe à la construction.

L'analyse des accidents qui ont survécu avant permet d'identifier les évènements de base et la genèse et l'évolution de l'évènement dans ses diverses composantes

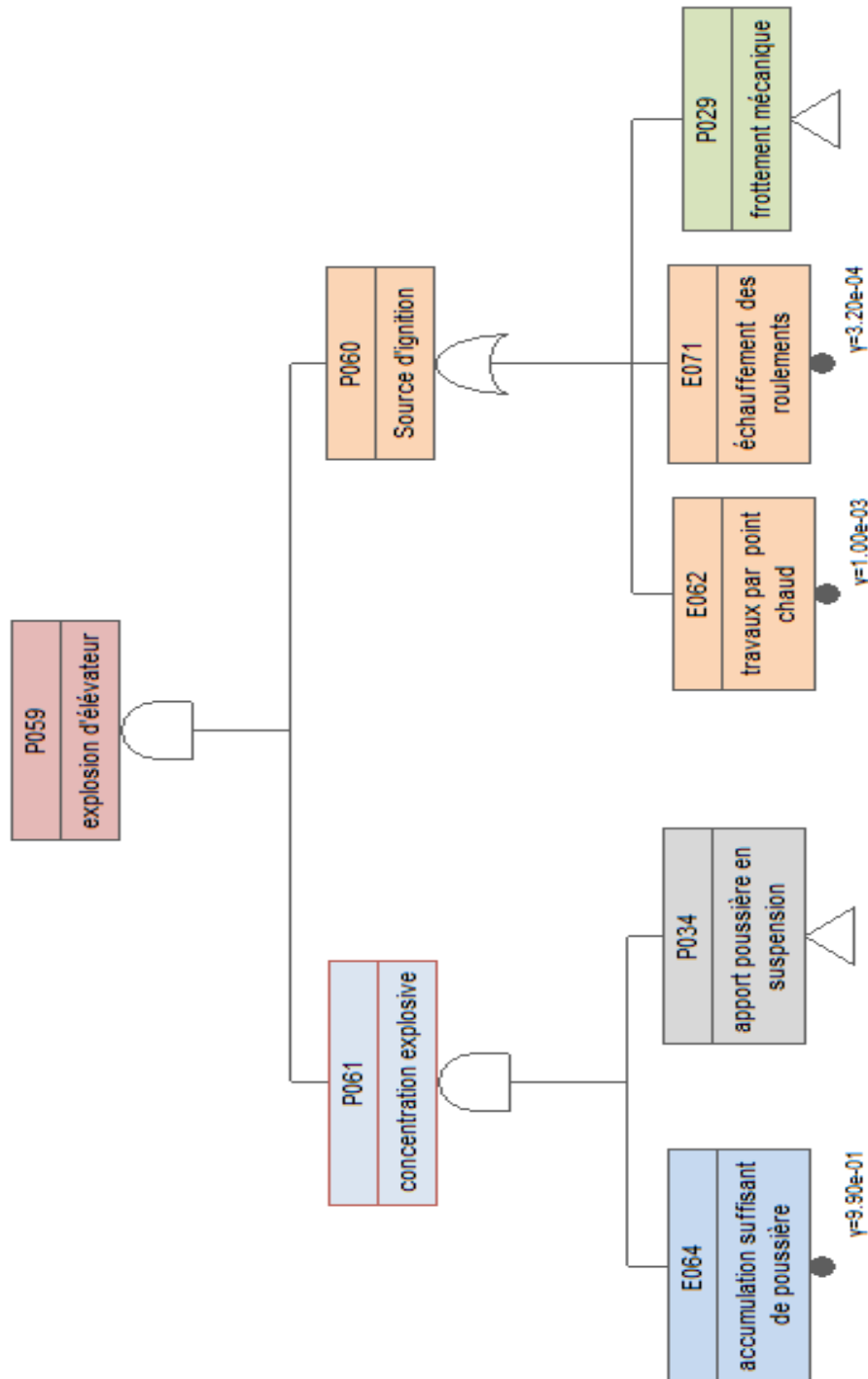


Figure 30 - Structure générale de l'ADD d'explosion d'élévateur à godet

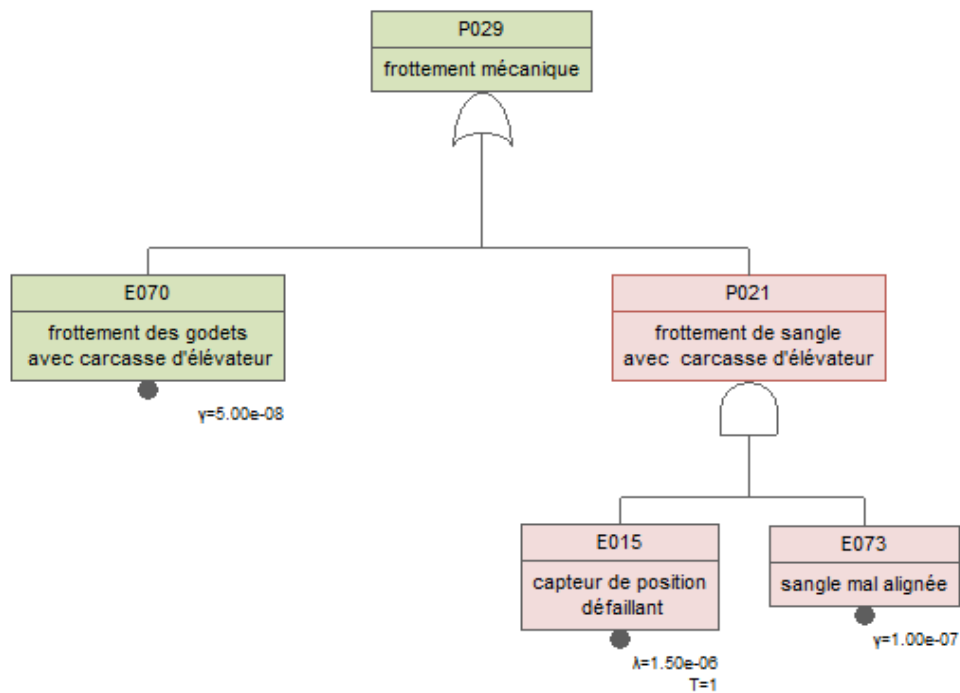


Figure 31 - Sous-système (frottement mécanique)

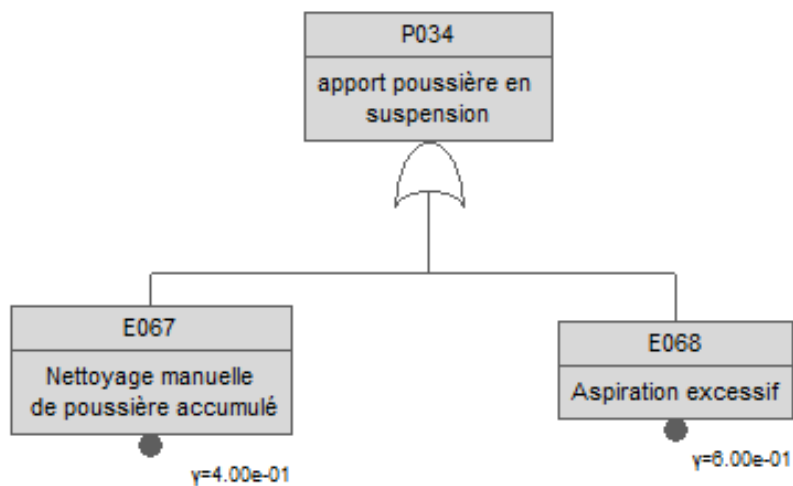


Figure 32 - Sous-système (apport de poussière en suspension)

#### 4.2. PROBABILITES DES EVENEMENTS :

Évènement	Description	Loi	Probabilité
E015	Capteur de position défaillant	Exponentielle	1.5e-06
E062	Travaux par point chaud	Constante	0.001
E064	Accumulation suffisant de poussière	Constante	0.99
E067	Nettoyage manuelle de poussière accumulé	Constante	0.4
E068	Aspiration excessif	Constante	0.6
E070	Frottement des godets avec carcasse d'élévateur	Constante	5e-08
E071	Échauffement des roulements	Constante	0.00032
E073	Sangle mal alignée	Constante	1e-07

Tableau 9 - Liste des événements de base utilisés dans ADD

Nous lançons la simulation pour 1 ans (8760 h).

- on a utilisé trois modèles de loi pour calculer les probabilités des évènements :

Les lois de probabilités de défaillances des événements élémentaires sont décrites ci-après avec leurs paramètres de fiabilité.

Paramètres généraux :

- $\gamma$  : Probabilité à la sollicitation
- $\lambda$  : Taux de défaillance
- $t$  : Temps de mission(8760h)

→ Loi constante : La loi « Constante » correspond aux éléments dont la probabilité de défaillance est constante et s'exprime par :

$$Q(t) = \lambda$$

→ La loi « Exponentielle » correspond aux éléments non réparables, la probabilité de défaillance s'exprime par la formule :

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

### 4.3. MESURES D'IMPORTANCE :

Les facteurs d'importance probabilistes sont des mesures très importantes pour évaluer le rôle des composants qui contribuent dans l'occurrence de la défaillance du système. Par l'attribution d'une valeur numérique à chaque composant en termes de probabilité. Il serait facile de les classer selon leur criticité vis-à-vis l'évènement à étudier soit sommet ou bien intermédiaire afin de nous aider dans l'identification des parties critiques à prendre en considération dans le système. [23]

De façon parallèle, selon le théorème bayésien, les mesures d'importance peuvent être représentées dans la nouvelle approche et calculées par leurs relations logiques dans RB.

#### 4.3.1. MESURE D'IMPORTANCE DE BIRNBAUM :

Il peut être calculé comme la somme des probabilités pour le système d'être dans ses états critiques pour le composant  $i$ . Une expression pour  $G_i(t)$  peut également être donnée en termes de probabilité conditionnelle. Si  $p(s=yes | i=yes)$  indique la probabilité



que le système défaillant étant donné que le composant i est défaillant .et  $p (s=yes | i=no)$  est la probabilité que le système défaillant avec le composant i fonctionnant, alors :

$$G_i(t) = p (s=yes | i=yes) (t) - p (s=yes | i=no) (t).....$$

### 4.3.2. MESURE DE CRITICITE D'IMPORTANCE :

La mesure de criticité de l'importance d'un composant i est noté I(t) et elle est définie comme la probabilité que le système soit dans un état critique pour le composant i compte tenu de la probabilité de défaillance du composant i,  $P_i(t)$ , pondérée par l'indisponibilité du système  $P_s(t)$

$$I(t) = G_i(t) \cdot P_i(t)/P_s(t)$$

Compte tenu de l'occurrence de l'événement Sommet, cette mesure détermine si la défaillance du système est le résultat de la défaillance du composant. La mesure de criticité modifie la mesure de Birnbaum en considérant la probabilité de défaillance du composant. De cette manière, il est possible d'éviter d'attribuer des mesures de haute importance à des événements qui sont très peu susceptibles de se produire en se concentrant sur les événements de base vraiment importants. La mesure de criticité est donc appropriée pour améliorer les performances du système. [41]

### 4.4. DESCRIPTION STRUCTURELLE DE L'ARBRE :

Notre arbre est nommé en tête par l'événement redouté principale « EXPLOSION d'élévateur à godet », ce dernier occasionné par deux (2) événements redouté secondaires, ces deux événements sont le résultat du déclenchement du plusieurs événements élémentaires (8 événements de base), l'un de ces derniers présentent une source d'ignition (P060) qui présente l'un de deux évènements secondaires, et les restes(E065,E067 et E068) constituent des évènements qui contribuent à produire un atmosphère explosif(P061) ,tous les évènements de base sont liés soit aux facteurs techniques, soit aux facteurs humains.

### 4.5. ANALYSE QUANTITATIVE :

- Probabilité d'occurrence de BLEVE qui obtenue par logiciel :  $P = 0.00131$

#### 4.5.1. ORDRES DES COUPES MINIMALES :

Ordre	Quantité
3	6
4	2

*Tableau 10 - liste des ordres des coupes minimales existant dans ADD*

## CHAPITRE III : Description du phénomène d'explosion et AdD.

Le tableau ci-dessous présente le nombre total de coupes par ordre

### 4.5.2. LES COUPES MINIMALES :

La structure de notre arbre de défaillance représente 8 coupes minimales où des coupes minimales sont 6 d'ordre 3 avec 2 coupes d'ordre 4

N°	Ordre	Probabilité	Pourcents	Évènement	Description
1	3	0.000594	45.5%	E062	Travaux par point chaud
				E064	Accumulation suffisant de poussière
				E068	Aspiration excessif
2	3	0.000396	30.3%	E062	Travaux par point chaud
				E064	Accumulation suffisant de poussière
				E067	Nettoyage manuelle de poussière accumulé
3	3	0.00019	14.5%	E064	Accumulation suffisant de poussière
				E068	Aspiration excessif
				E071	Échauffement des roulements
4	3	0.000127	9.7%	E064	Accumulation suffisant de poussière
				E067	Nettoyage manuelle de poussière accumulé
				E071	Échauffement des roulements
5	3	2.97e-08	0.0%	E064	Accumulation suffisant de poussière
				E068	Aspiration excessif
				E070	Frottement des godets avec carcasse d'élévateur
6	3	1.98e-08	0.0%	E064	Accumulation suffisant de poussière
				E067	Nettoyage manuelle de poussière accumulé
				E070	Frottement des godets avec carcasse d'élévateur
7	4	8.91e-14	0.0%	E015	Capteur de position défaillant
				E064	Accumulation suffisant de poussière
				E068	Aspiration excessif
				E073	Sangle mal alignée
8	4	5.94e-14	0.0%	E015	Capteur de position défaillant
				E064	Accumulation suffisant de poussière
				E067	Nettoyage manuelle de poussière accumulé
				E073	Sangle mal alignée

Tableau 11 - Les coupes minimales

### 4.5.3. FACTEURS D'IMPORTANCE :

Le tableau ci-après contient les facteurs d'importances de chacun des évènements de base contribuant à l'évènement redouté.

Événement	Description	Occ	Pr	MIF	CIF	DIF	RAW	RRW	RS Sensibility
E064	Accumulation suffisant de poussière	8	0.99	0.0013	1	1	1	6E+15	1,0E+02
E067	Nettoyage manuelle de poussière accumulé	4	0.4	0.0013	0.4	0.64	1.6	1.7	7.2
E068	Aspiration excessif	4	0.6	0.0013	0.6	0.84	1.4	2.5	14
E062	Travaux par point chaud	2	0.001	0.99	0.76	0.76	7.6E+02	4.1	25
E071	Échauffement des roulements	2	0.00032	0.99	0.24	0.24	7.6E+02	1.3	4.1
E070	Frottement des godets avec carcasse d'élévateur	2	5,00E-08	0.99	3.8E-05	3.8E-05	7.6E+02	1	1
E015	Capteur de position défaillant	2	1.5E-06	9.9E-08	1.1E-10	1.5E-06	1	1	1
E073	Sangle mal alignée	2	1,00E-07	1.5E-06	1.1E-10	1E-07	1	1	1

*Tableau 12 - Liste des facteurs d'importances.*

### 4.5.4. INTERPRETATION DES RESULTATS OBTENUS

L'analyse des résultats Dressé dans le tableau ci-dessus montre avec évidence que la méthode arbre de défaillance a donné des résultats très cohérentes avec la réalité, On prend le CIF comme une référence de classification des évènements de base, Nous remarquons qu'il y a des évènements de base qui sont les plus à redouter.

Le classement des évènements suivants en ordre décroissant de défaillance se manifeste comme suite :

Accumulation suffisant de poussière qui présente l'évènement de base le plus fort dont la valeur du facteur d'importance critique « CIF » est de 1, et pour empêcher l'occurrence de cet évènement on propose des mesures tel que :

- Assurer le bon fonctionnement de système de dépoussiérage par :
- Éviter les fuites de poussières au niveau de système ;
- Assurer le nettoyage périodique des filtres de système de dépoussiérage ;
- Installer des capteurs de poussière au niveau des points critiques qu'ils sont sujet du risque d'explosion de poussière ;
- Assurer l'aspiration de poussière sur les points où il y a une émission importante de poussière.

Suivie par travaux par points chauds dont la valeur du facteur d'importance critique « CIF » est 0,76, nous citons comme recommandation :

Éviter le maximum les travaux par point chaud au niveau des points où il y a une accumulation de poussière, s'il est impossible d'éviter les travaux par point chaud il faut prendre toutes les mesures de sécurité nécessaires pour que tout explosion ne peut pas se produire tel que l'exigence d'un permis de feu.

En outre, l'Aspiration excessif dont la valeur du facteur d'importance critique « CIF » est de 0,6

- Ajuster le régime de rotation des ventilateurs d'aspiration de poussière.
- Les ventilateurs utilisés pour le transport de la poussière doivent être adaptés à la zone d'usage
- Les systèmes de dépoussiérage doivent être en fonctionnement avant la mise en route des équipements de travail.

### 5. CONCLUSION

Dans ce chapitre on a parlé de phénomène d'explosion de poussière agroalimentaire, ces conditions et son déroulement, ainsi l'accidentologie sur le silo et retour d'expérience pour savoir les événements et les causes pouvant contribuer au risque d'explosion.

En outre dans l'autre partie nous avons utilisé logiciel Arbre Analyste pour construire l'arbre correspondant au risque « explosion d'élévateur à godet », ainsi que l'analyse quantitatif de probabilité du phénomène et analyser les résultats obtenus sur la base des facteurs d'importances, à la suite de ce qu'on a fait on a pu identifier les événements de base critiques pouvant produire événement redouté.

# **CHAPITRE IV : Application du Réseau Bayésienne.**

### 1. INTRODUCTION

Le réseau bayésien montre une puissance de modélisation accrue, il est considéré comme une méthode d'analyse probabilistes des systèmes et ses composants, il a été fréquemment utilisé comme un modèle pour une étude plus approfondie pour son efficacité visuelle et conceptuelle afin de représenter les relations entre les défaillances et les pannes d'un système. Ce modèle a été établi par le passage d'un arbre de défaillance, comme étant une méthode classique d'analyse quantitative des risques, vers le réseau bayésien en se basant sur des études de recherche récentes. [23]

Ce chapitre fournit une explication détaillée sur la conversion de l'arbre de défaillance vers les réseaux bayésiens suivant une algorithmme, ainsi que l'utilisation de l'inférence bayésienne afin de calculer les facteurs d'importance par un autre logiciel qui s'appelle MSBNx

### 2. JUSTIFICATION DU CHOIX DE L'APPROCHE RESEAU BAYESIENNE

Le réseau bayésien a été choisi comme étant notre démarche d'aide à la décision pour les intérêts suivant :

Permet d'obtenir une connaissance enrichie, dont l'incertitude est plus faible : où la probabilité a posteriori représente la nouvelle connaissance pour l'analyste ; Ces applications dans l'industrie grâce au principe d'actualisation dynamique des connaissances, utilisé en particulier pour l'actualisation des bases de données sur les défaillances.

La possibilité de convertir l'arbre de défaillance en réseau bayésiens plus facilement et établir des analyses plus approfondies en utilisant des probabilités a priori obtenues par les méthodes d'analyse classiques, les bases des données, le retour d'expérience et le jugement d'experts.

L'inférence dans les réseaux bayésiens peut représenter les défaillances et pannes observés et les probabilités à posteriori permettent d'identifier les causes possibles. Ces probabilités peuvent être réutilisées comme probabilités de connaissance (à priori) pour une mise à jour du réseau.

## 3. CONVERTIR Add A RB :

A partir un algorithme d'obtention d'un RB à partir d'un Add est proposé ci-dessous avec une simplification présentée dans un figure, dans cet Algorithme il est supposé que le Add n'aura que des portes logiques « ou », « et », le RB résultant sera binaire et ces variables représenteront les états des composants d'un système et les deux valeurs qu'elles pourront prendre seront désignées par faux « F » pour l'état de fonctionnement et par vrai « V » pour l'état défaillant. Cependant, l'algorithme peut être généralisé à n'importe quel Add.

### 3.1. CONCERNANT LA PARTIE QUALITATIVE DU RB :

1. Tout évènements de base du Add correspond à un nœud racine (parent) dans le RB.
2. Pour chaque nœud pivot 'feuille' du BN correspondant à un événement sommet ou intermédiaire désigné par la porte logique dans l'Add selon l'emplacement, en particulier la dernière porte logique et l'événement sommet finale de l'Add sera étiquetée en tant que nœud de défaillance.
3. Les nœuds du RB doivent être connectés entre eux selon l'arrangement des portes logique de l'Add.

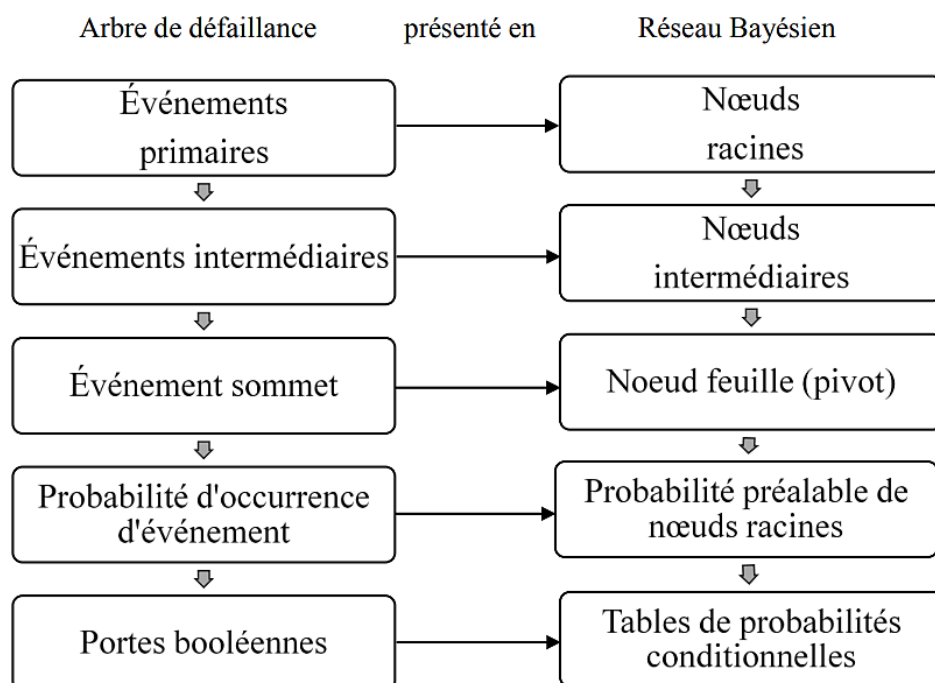


Figure 33 - Organigramme représentant un algorithme simplifié pour représenter un Add en RB

## 3.2. EN CE QUI CONCERNE LA PARTIE QUANTITATIVE (PROBABILITE) DU RB :

1. Pour chaque nœud racine du RB la même probabilité antérieure de l'événement de base correspondant dans l'ADD est attribuée ;
2. Chaque porte logique 'ou', 'et', dans l'ADD correspond à une table de probabilité conditionnelle équivalente dans le RB.

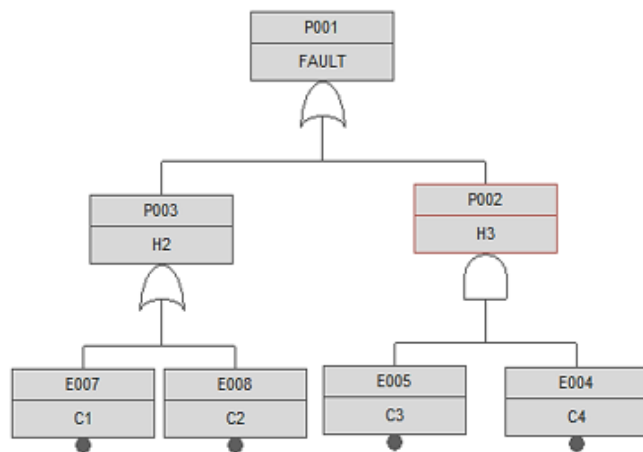
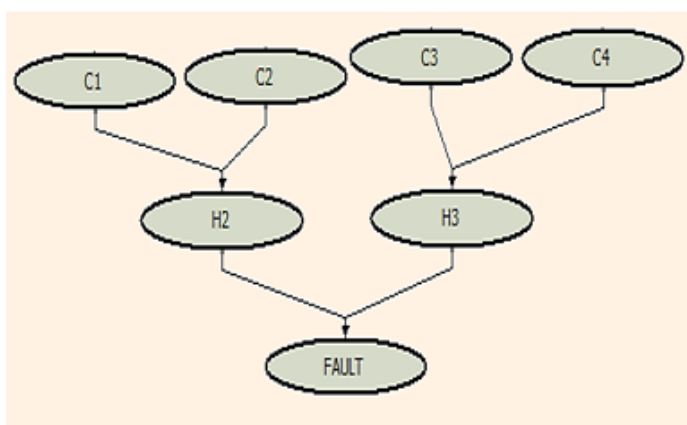


Figure 34 - Les événements de base C1, C2, B3 et C4 correspondent aux nœuds racines ; les portes H2 et H3 correspondent aux nœuds intermédiaires H2 et H3 et l'événement « FAULT » correspond au nœud de défaillance.

Assessment (Model: Model0, Node: H3\_AND\_)

Parent Node(s)		H3_AND_		
C3	C4	Yes	No	bar charts
Yes	Yes	1,0	0,0	
	No	0,0	1,0	
No	Yes	0,0	1,0	
	No	0,0	1,0	

Figure 35 - TPC correspondant à une porte ET.

- Pour une porte ET, telle que H2 sur la Figure 34, le TPC donnera le résultat de la Figure 35
- Pour une porte OU, telle que H3 sur la Figure 34, le TPC sera celui de la Figure 36

Assessment (Model: Model0, Node: H2\_OR\_)

Parent Node(s)		H2_OR_		
C1	C2	Yes	No	bar charts
Yes	Yes	1,0	0,0	
	No	1,0	0,0	
No	Yes	1,0	0,0	
	No	0,0	1,0	

Figure 36 - TPC correspondant à une porte OU.



La méthode de conversion peut être étendue aux AdD avec d'autres portes et les TPC des réseaux correspondants suivront les tables logiques des portes.

### 4. RB OBTENU A PARTIR DE AdD AVEC DES EVENEMENTS REPETES :

Les événements de base qui apparaît plusieurs fois dans l'AdD (événements répétés), peuvent être représentés dans les RB en créant simplement un seul nœud pour les événements de base répétés et en le reliant avec plusieurs arcs vers les nœuds correspondant aux événements répétés.

Sur la Figure 37, l'AdD fait apparaître l'événement de base A deux fois en tant que sortie des portes G2 et G3.

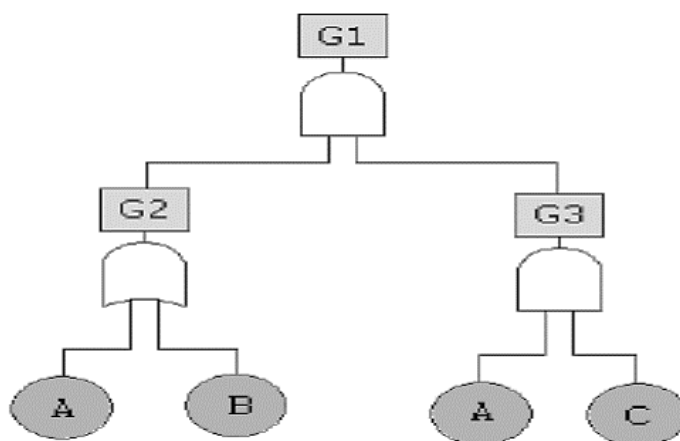


Figure 37 - Exemple de AdD avec événements répétés.

Le BN correspondant au AdD sur la Figure 37 est indiqué sur la Figure 38. Le nœud A n'apparaît qu'une seule fois mais est lié par deux liens vers les nœuds G2 et G3.

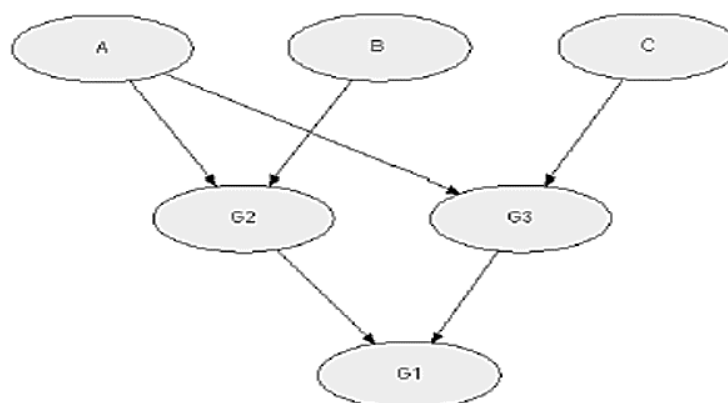


Figure 38 - RB correspondant à la Figure 37

Lorsqu'un AdD a de nombreux événements répétés, son RB correspondant peut prendre une structure graphique où les arcs se croisent d'une manière qui peut rendre la compréhension visuelle du réseau plus compliquée.

## CHAPITRE IV : Application du Réseau Bayésienne.

La même procédure peut être appliquée pour un Add avec des branches répétées. Le RB correspondant résultera en des nœuds avec plus d'un arc comme dans la Figure 39 et la Figure 40.

Les intersections des arcs, en particulier pour les grands réseaux, est un inconvénient du graphique.

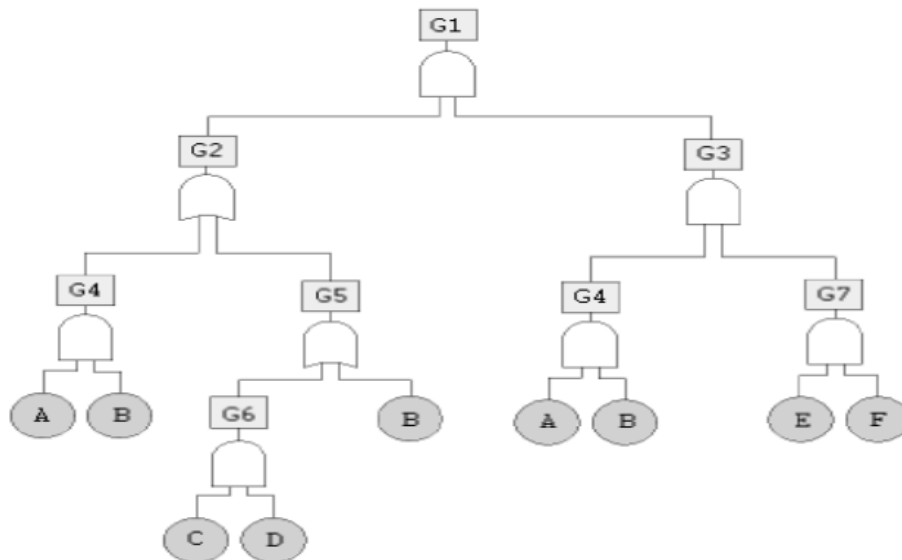


Figure 39 - Exemple de Add avec des branches répétées.

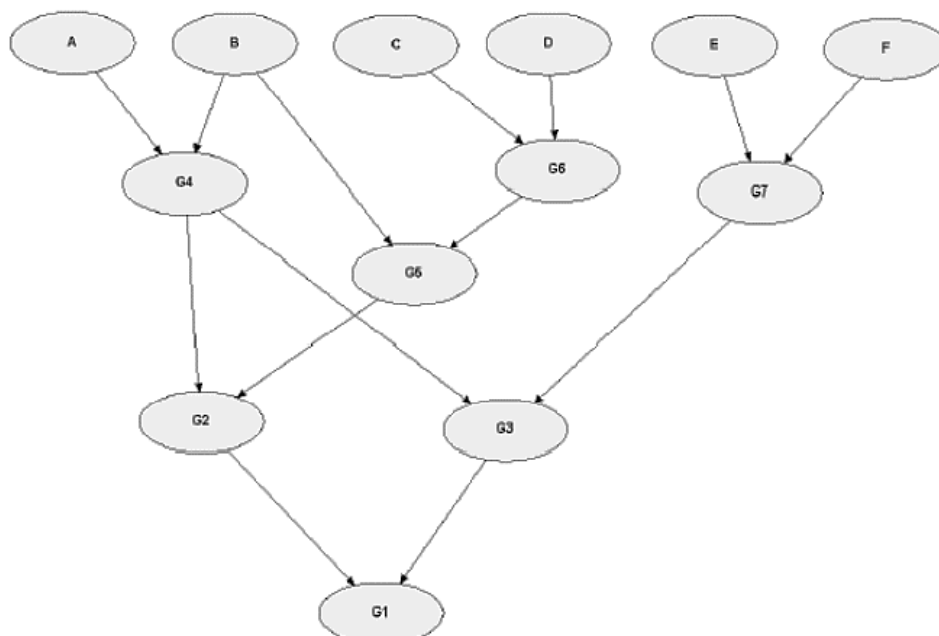


Figure 40 - Exemple de RB correspondant au Add sur Figure 39

Même s'il n'est pas possible de mettre à jour la probabilité à la suite de preuves avec Add, des mesures d'importance sont utilisées afin d'obtenir des informations sur la criticité des composants du système.

## 5. APPLICATION :

En suivant les étapes de l'algorithme de conversion pour la partie qualitative du ADD, la structure du RB résultera comme sur la Figure 41. On voit que 8 nœuds racines ont été créés correspondant aux événements de base de ADD. Les autres portes correspondent à des tableaux conditionnels.

### 5.1. STRUCTURE DE RESEAU BAYESIEN :

Élaboration de réseau fait à l'aide de logiciel MSBNx de Microsoft

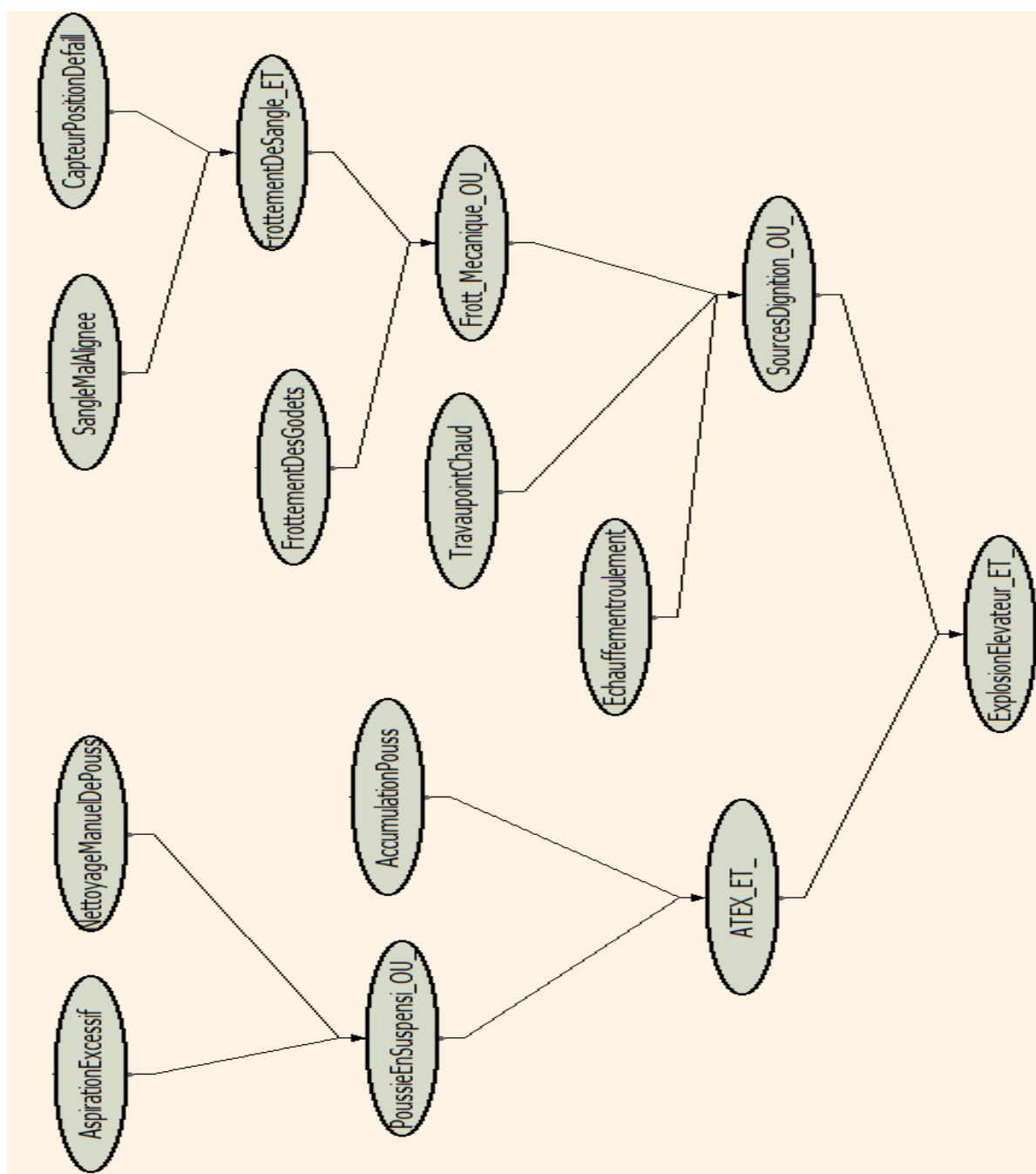


Figure 41 - Structure de réseau bayésienne d'explosion d'un élévateur à godet

**5.2. PROBABILITE A POSTERIORI :**

$$P(A|B) = \frac{P(B|A)P(A)}{P(B)}$$

A : événement de base étudié,

B : événement(s) observé(sommet),

(A/B) : probabilité a postériori de réalisation de l'événement A sachant que B a été observé.

Les calculs ADD et RB conduisent presque les mêmes résultats. En supposant que le phénomène est survenu, c'est-à-dire en mettant en évidence (Vrai) du nœud Sommet.

Le calcul ce fait directement par logiciel MSBNx, les probabilités postériori des composants individuels sont calculées et représentées sur le tableau ci-dessous.

Node Name	State 0	State 1
accumulation pouss	Yes	No
	1,0000	0,0000
aspiration excessif	Yes	No
	0,7895	0,2105
atex	Yes	No
	1,0000	0,0000
capteur position defaill	Yes	No
	0,0000	1,0000
echauffementroulement	Yes	No
	0,2425	0,7575
explosion	Yes	No
	1,0000	0,0000
frottement mecanique	Yes	No
	0,0000	1,0000
frottementgodetaveccarcasse	Yes	No
	0,0000	1,0000
mise pouss en suspensi (ou)	Yes	No
	1,0000	0,0000
nettoyage manuel de pouss	Yes	No
	0,5263	0,4737
sangle mal alignee	Yes	No
	0,0000	1,0000
source dignition	Yes	No
	1,0000	0,0000
travaupoint chaud	Yes	No
	0,7577	0,2423
frottement de sangle	Yes	No
	0,0000	1,0000

Figure 42 - Probabilités postérieures des composants, étant donné que le système est défaillant

D'après les calculs on remarque que :

### 1. Concernant les nœuds intermédiaire : on a

- Les deux nœuds « source d'ignition » « ATEX » et « Accumulation suffisant » de poussière être celui qui ont la plus forte probabilité d'avoir provoqué l'occurrence d'évènement sommet (1).

### 2. Concernant les nœuds racines (parents) : on a

- Le nœud « Aspiration excessif » être celui qui a la plus forte probabilité d'avoir provoqué l'occurrence d'évènement sommet (0.7895),
- Suivie par nœud « Travaux par point chauds » (0.7577).
- Après le nœud « nettoyage manuelle de poussière » (0.5263)

### 5.3. CALCULE DE FACTEUR D'IMPORTANCE DE BIRNBAUM :

Évènement	Probabilité Sys « yes » = défaillance Eve « yes » = défaillance	Probabilité Sys « yes » = défaillance Eve « no » = fonctionné	Mesure brinbuam
Travaux par point chaud	0,752400000	0,000240806	0,7521591940
Échauffement des roulements	0,752400000	0,000752438	0,7516475620
Frottement des godets avec carcasse d'élévateur	0,752400000	0,000992927	0,7514070730
Accumulation suffisant de poussière	0,001002990	0,000000000	0,0010029900
Aspiration excessif	0,001306530	0,000522613	0,0007839170
Nettoyage manuelle de poussière accumulé	0,001306530	0,000783920	0,0005226100
Sangle mal alignée	0,000994092	0,000992965	0,0000011270
Capteur de position défaillant	0,000993040	0,000992965	0,0000000750

Tableau 13 - Calcule de Facteur d'importance de Birnbaum.

**5.4. CALCULE DE FACTEUR D'IMPORTANCE DE CRITICITE :**

Évènement	Probabilité Système	Probabilité défaillance d'évènement	Mesure brinbuam	Mesure de criticité
Travaux par point chaud	0,00131	0,001	0,7521591940	0,57858399538
Échauffement des roulements		0,00032	0,7516475620	0,18502093834
Frottement des godets avec carcasse d'élèveateur		5.00E-08	0,7514070730	0,00002890027
Accumulation suffisant de poussière		0,99	0,0010029900	0,76381546154
Aspiration excessif		0,6	0,000783917	0,36180784615
Nettoyage manuelle de poussière accumulé		0,4	0,000522610	0,16080307692
Sangle mal alignée		1.00E-07	0,000001127	0,00000000009
Capteur de position défaillant		1.50E-06	0,000000075	0,00000000009

Tableau 14 - Calcul du Facteur d'importance de Criticité.

Il a été observé que les évènements de base qui ont probabilité de postériori plus fort sont les mêmes celui qui ont une haute valeur mesure de criticité similaire.

**5.5. COMPARAISON DES RESULTATS :**

Dans le tableau ci-dessous on a essayé de faire une comparaison des valeurs de la mesure de probabilité postérieure et de criticité des composants du système.

EVENEMENT	Proba posteriori d'évènement	Mesure brinbuam	Mesure de criticité
Travaux par point chaud	0,7577	0,7521591940	0,57858399538
Échauffement des roulements	0,2425	0,7516475620	0,18502093834
Frottement des godets avec carcasse d'élèveateur	0,00	0,7514070730	0,00002890027
Accumulation suffisant de poussière	1	0,0010029900	0,76381546154
Aspiration excessif	0,7895	0,000783917	0,36180784615
Nettoyage manuelle de poussière accumulé	0,5263	0,000522610	0,16080307692
Sangle mal alignée	0,00	0,000001127	0,00000000009
Capteur de position défaillant	0,00	0,000000075	0,00000000009

Tableau 15 - Comparaison entre les valeurs de la mesure de probabilité postérieure et de criticité des composants.

Facteur	MIF		CIF		Posteriori Proba	
	Évènement	Valeur	Évènement	Valeur	Évènement	Valeur
ADD	Travaux par point chaud	0.99	Travaux par point chaud	0.76		
	Aspiration excessif	0.0013	Aspiration excessif	0.6		
	Échauffement des roulements	0.99	Échauffement des roulements	0.24		
RB	Travaux par point chaud	0,752	Travaux par point chaud	0,578	Travaux par point chaud	0,7577
	Aspiration excessif	0,0007839	Aspiration excessif	0,362	Aspiration excessif	0,7895
	Échauffement des roulements	0,75164756	Échauffement des roulements	0,185021	Échauffement des roulements	0,2425
			Accumulation suffisant de poussière	0,7638155	Accumulation suffisant de poussière	1

*Tableau 16 - Résumé des résultats de comparaison entre ADD et RB.*

Selon les résultats obtenus par AdD et RB, on peut remarquer que les événements qui ont probabilité considérable à l'occurrence d'évènement sommet sont les mêmes, mais les valeurs obtenues par le RB sont plus précises que celles obtenues par l'Add.

En outre en ce qui concerne le facteur de criticité on peut dire que le RB peut identifier des événements critiques que l'AdD ne peut pas tel que l'évènement « Accumulation suffisant de poussière »

## 6. CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons appliqué d'une part l'algorithme de conversion de l'Add vers réseau bayésien sur notre Add, et d'autre part les lois probabilistes pour obtenir les calculs des mesures tels que la mesure de criticité et facteur de Brinbuam

Après le calcul et la comparaison des résultats obtenus avec celles de l'Add on peut conclure que le réseau bayésien peut être utilisé pour l'analyse le même que l'Add, en outre il comble l'insuffisance de l'Add à l'aide de l'inférence par le calcul des probabilités a posteriori à chaque niveau du réseau et avec résultats plus précis.

### CONCLUSION GENERALE

Les travaux de recherche présentés dans ce mémoire, ont pour objectif de faire une analyse qualitative et quantitative de risque d'explosion des établissements de stockage des céréales.

Dans la partie théorique de cette mémoire, nous avons premièrement présenté les différentes méthodes d'analyse des risques, ses principes, son déroulement et ses limites et avantages, ensuite on a présenté la structure générale du silo agro-alimentaire, ses différents équipements et son principe de fonctionnement.

Après avoir montré les avantages et les limites des méthodes d'analyse des risques présentés dans ce mémoire, nous avons trouvé intéressant d'utiliser la méthode de l'arbre de défaillance pour déterminer les causes possibles pour qu'une explosion se produise.

Le retour d'expérience tiré de la base ARIA montre que les accidents d'explosions dans les silos se manifestent fréquemment au niveau d'élévateur à godet, ce qui a porté notre choix sur cette partie du système.

En partie pratique, la simulation de l'arbre des défaillances nous a permis, d'après l'utilisation du facteur d'importance critique (CIF), de définir les événements de base critiques et qui influent beaucoup sur la manifestation de l'évènement sommet (explosion d'élévateur à godet), ils sont mentionnés comme suit :

- **Travaux par point chauds**, qui est considéré comme une source d'ignition.
- **Accumulation suffisante de poussière** au niveau d'élévateur à godet.
- **Aspiration excessive de poussière.**

Dans la deuxième phase de cette partie la conversion de l'arbre de défaillance vers le réseau bayésien en utilisant l'algorithme de conversion mentionnée précédemment dans ce document ainsi que l'utilisation de l'inférence bayésienne pour l'obtention de la probabilité à posteriori et des facteurs d'importances probabilistes.

Les calculs du facteur d'importance critique (CIF), montrent que les résultats sont identiques à celle de l'arbre de défaillance, représenté en (accumulation suffisante de



poussière), (travaux par point chaud) et (aspiration excessive de poussière), Avec des valeurs plus précises.

Pour réduire la probabilité d'occurrence d'explosion d'élévateur à godet, il faut prendre des mesures préventives sur les installations. Face aux événements les plus critiques trouvés par le modèle développé dans ce projet, il a été recommandé de :

1. Assurer le bon fonctionnement de système de dépoussiérage.
2. Exiger l'application de permis de feu pour assurer que les travaux par point chaud ne présentent pas une source d'ignition d'une explosion.
3. Limiter le risque d'aspiration excessif des poussières :
  - En ajustant le régime de rotation des ventilateurs d'aspirateur.
  - En adaptant les ventilateurs utilisés pour le transport de la poussière à la zone d'usage.
  - Planifier la maintenance préventive de système de dépoussiérage.

La recherche comporte certaines limites, qui peuvent être résumées comme suit :

- L'insuffisance des données des taux de défaillances des composants.
- Le modèle de l'arbre des défaillances est booléen : un événement à seulement 2 états, vrai ou faux, les modes dégradés ne sont pas pris en compte.

## BIBLIOGRAPHY

- [1] Les accident des silos de matières végétales, ARIA.
- [2] R, Ribereau-Gayon, Les explosion de poussière dans le stockage agroalimentaire, 1999.
- [3] A, Desroches, Concepts et méthodes probabilistes de base de la sécurité, Lavoisier.
- [4] Norme-CEI:61508, Functional Safety of Electrical/Electronic/Programmable Electronic (E/E/PE) safety related systems, International Electro-technical Commission (IEC), 1998.
- [5] OHSAS-18001, Système de management de la santé et de la sécurité au travail Spécification - BSI, AFNOR, 1999.
- [6] A, Villemeur, Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels, Eyrolles, 1998.
- [7] F. Emeric, Méthodologie d'évaluation des risques dans les AASQA, INERIS, 2004.
- [8] Ministère de l'écologie française, Les risques majeurs, France, 2007.
- [9] Larousse, Définitions, Larousse, 2006.
- [10] Norme ISO 14000 - Systèmes de management environnemental., ISO.
- [11] A, Desroches; A, Leroy; F, vallée, La gestion des risques : principes et pratiques.
- [12] ISO, Management du risque : Vocabulaire, Principes directeurs pour l'utilisation dans les normes, Organisation internationale de normalisation, 2002.
- [13] Guide-ISO/CEI, Aspects liées à la sécurité - Principes directeurs pour les inclure dans les normes, ISO, 1999.
- [14] F, Delmer; T, Tanzi, Ingénierie du risque, France: Lavoisier, 2003.
- [15] Glossaire technique des risques technologiques, annexé à la circulaire n° DPPR/SEI2/MM-05-0316 relatif aux installations classées, 07/10/2005 .
- [16] Rapport OMEGA 7, INERIS, 2006.
- [17] A, Villemeur, Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels, France, 1988.
- [18] Les cahier de la sécurité N°13 - sécurité des installation - Méthodologie de l'analyse des risques, Union des industries chimiques, 1998.
- [19] Guidelines for Hazard Evaluation Procedures, Center for Chemical Process Safety, American Institute of Chemical Engineers AICHE, 1992.
- [20] Norme-CEI:60812, Techniques d'Analyse de la Fiabilité des Systèmes Procédure d'Analyse des Modes de Défaillances et de leurs Effets (AMDE), 1985.

- [21] Norme-CEI:61882, Etudes de danger et d'exploitabilité (études HAZOP) - Guide d'application, 2001.
- [22] Etude de sécurité sur schéma de circulation des fluides, Union des Industries Chimiques, 1980.
- [23] GUETARNI, Islam Hadj Mohamed, Analyse Quantitative des Risques : Application sur les Bacs de Stockage, Oran: Université d'Oran 2 :Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle, 2019.
- [24] Norme-CEI:61025, Analyse par Arbre de Panne (APP), 1990.
- [25] AZZABI, Bara Oualiy Eddine; ATALLAH, Ibrahim, ANALYSE DU RISQUE D'UN BAC SOUS PRESSION PAR LES RESEAUX BAYESIENS>>, Université Oran2 - Institut de maintenance et de sécurité industrielle, 2020.
- [26] VERRON, Sylvain, Thèse de doctorat: Diagnostic et surveillance des processus complexes par Réseaux Bayésien, Ecole doctorale d'Angers, 2007.
- [27] P, Naim; P, Henri; K, Wuillemin; P, Leray; O, Pourret; A, Becker, Réseaux Bayésiens; 3ème Edition, Eyrolles, 2007.
- [28] M, Bouaziz; E, Zamaï; S, Hubac, Modélisation de l'état de santé d'un équipement de fabrication par une méthode probabiliste : Application aux ateliers semi-conducteurs; 9e Conférence Internationale de Modélisation, Optimisation et Simulation MOSIM'12, Bordeaux, France: MOSIM'12, 2012.
- [29] BOUZAIËNE-MARLE, Leïla, Thèse de doctorat; Anticipation du Vieillissement par Interrogation et Stimulation d'Experts, Ecole Centrale Paris, 2005.
- [30] GEFEG, Les technologies françaises de stockage des grains, GEFEG.
- [31] Ministère de l'environnement française, Les silos et leurs équipements – enquêtes, 1997.
- [32] N, Dechy; L, Perrette, «Etude de la réglementation étrangère s'appliquant aux silos,» INERIS.
- [33] Accidentologie silos bois et céréales depuis 2005, BARPI.
- [34] «mélange explosifs - poussières,» INRS.
- [35] «larousse.fr».
- [36] «vienne.gouv.fr,» [En ligne]. Available: <https://www.vienne.gouv.fr/content/download/22956/139063/file/DDAE%20Ets%20Liot%20Chatellerault%20Partie%202%20DF1.pdf>.
- [37] P, Roux, «Guide pour la conception et l'exploitation, de silos de stockage de produits agro-alimentaires vis-à-vis des risques d'explosion et d'incendie,» INERIS.
- [38] Abderraouf, Hadj Mabrouk; Habib, Hadj Mabrouk, «Approche d'intégration de l'erreur humaine dans le retour d'expérience - page 62».