



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 و الأمن الصناعي
Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle

Département de sécurité industrielle et environnement

MÉMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Hygiène et sécurité industrielle
Spécialité : sécurité industrielle et environnement

Thème

Pollution engendrée par les poussières agro-alimentaires - risque spécifique dans les minoteries et les semouleries –étude de l'explosion des poussières, mesures de prévention et mise en place de la protection- cas de BLAYE

Présenté et soutenu publiquement par :

MERZOUG Houaria

et

BOUDADI Latifa

Devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
BOUHADIBA Ibrahim	MCA	Université Oran 2	Président
KADDAR Mohamed	MAA	Université Oran 2	Encadreur
NADJI Mohamed Amine	MAB	Université Oran 2	Examineur

Année 2019/2020

REMERCIEMENTS

Ce travail est l'aboutissement d'un dur labeur et de beaucoup de sacrifices; nos remerciements vont d'abord au Créateur de l'univers qui nous a doté d'intelligence et nous a maintenu en santé pour mener à bien cette année d'études.

On souhaite également offrir nos sincères et chaleureux remerciements à notre encadreur de mémoire **Monsieur KEDDAR Mohamed**. Le mérite d'un mémoire appartient certes aux étudiants, mais également à leur encadreur.

Dans notre cas, notre encadreur a été d'un soutien et d'une attention exceptionnels, on lui remercie pour son orientation, ses conseils et la disponibilité qu'il nous a témoignée pour nous permettre de mener à bien ce travail.

Nos remerciements vont aussi à aux membres de notre jury **Monsieur BOUHADIBA Ibrahim** et **Monsieur NADJI Mohamed Amine** pour le grand honneur qu'ils nous font en acceptant d'examiner, de juger notre travail et de nous faire plaisir d'assister à la présentation de ce travail.

Dédicaces

Merci Allah (mon dieu) de m'avoir donné la capacité d'écrire et de réfléchir , la force d'y croire , la patience d'aller jusqu'au bout .

*Ce travail est dédié à ma très chère tante **MAHIEDINE Khaldia** décédée trop tôt, qui m'a toujours poussé et motivé dans mes études. J'espère que, du monde qui est sien maintenant, elle apprécie cet humble geste comme preuve de reconnaissance de la part de sa fille qui a toujours prié pour le salut de son âme. Puisse Dieu, le tout puissant, l'avoir en sa sainte miséricorde !*

*Je dédie ce modeste travail à celle qui m'a donné la vie, le symbole de tendresse, qui s'est sacrifiée pour mon bonheur et ma réussite , à ma mère **NADJEM Souad** merci pour tout chère maman .*

*A mon père **MERZOUG Miloud** , école de mon enfance , qui a été mon ombre durant toutes les années des études , et qui m'a encouragé que Dieu les garde et les protège .*

*A mes adorables et uniques frères **Mohamed Fethi** et **Seif Eddine** de partager mes délires, merci de me soutenir, Je vous dédie ce travail avec tous mes vœux de bonheur, de santé et de réussite, je vous exprime à travers ce travail mes sentiments de fraternité et d'amour.*

*A mon oncle **MERZOUG Djelloul** décédé dernièrement que Allah l'accueille dans son vaste paradis*

A toute ma famille pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire .

A mes chers amis qui ont toujours étaient à mes cotés et qui m'ont encouragé et soutenu .

*Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués, et le fruit de votre soutien infallible,
Merci d'être toujours là pour moi.*

MERZOUG Houaria

DEDICACES

Je dédie ce Modeste travail accompagné profond amour :

*A celle qui m'a arrosé de tendresse et d'espoirs, à la source d'amour incessible, à la
mère des sentiments qui ma bénie par ces prières ma mère*

BENLASRI Malika

*A mon support dans ma vie, qui m'a appris m'a supporté et ma dirigé vers la gloire
mon père **BOUDADI Ahmed***

*A ma chères sœur **Rania** et mon petit frère **Mohamed***

*A mon cher voisin **MOSTEFAI Houari** pour son aide*

*A ma meilleure amie **HOCINE Djenna***

*A ma chère amie **MALEK Amira** pour son aide.*

RESUME

Dès leur passage par le processus de la mouture, certains matières agro-alimentaires produisent des émissions des poussières qui accompagnent toutes les étapes de la production et ce depuis la première étape qui est le nettoyage passant par la mouture, le stockage et le transport jusqu'à la vente du produit fini.

La gravité de cette poussière est classée en fonction de leur dimension selon leur mode de formation : Plus les particules sont fines, plus la pollution est massive, menaçant la santé humaine à la première classe.

Les chercheurs et les spécialistes dans ce domaine et avec les nouvelles technologiques ont mis au point des paramètres et des dispositifs qui contribuent à réduire la pollution et donc à réduire les risques.

Malgré l'application effective de la prévention et la protection, ce secteur souffre encore d'accidents et d'incidents causés par les risques existants tel que les risques toxique, incendie, explosion et de leurs conséquences (formation des nuages toxiques, destruction des éléments....)

Dans ce mémoire, nous avons essayé de mettre en relief les mesures adéquates pour la éviter ou du moins réduire les divers risques spécifiques des poussières, les accidents survenant dans l'industrie agro-alimentaires (les minoteries et /ou les semouleries) et enfin leurs conséquences.

Mots clefs : Pollutions, Poussières, minoteries, semouleries, Incendie, Explosion

ABSTRACT

From the passage through the grinding, some food products must be produced by going through the milling process. The latter produces dust emissions that accompany all stages of its production, from the first stage of cleaning to grinding, storage and transport until the sale of the finished product.

The severity of this dust is classified according to their denials according to their mode of formation, the finer particles, the more massive pollution, threatening human health's in the first class.

Researchers and specialists in these fields and with new technologies have developed parameters and devices that help reduce pollution and therefore reduce risks.

Despite the effective application of prevention and protection, this sector still suffers from accidents and incidents caused by existing risks such as toxic risks, fire, explosion and their consequences (formation of toxic clouds, destruction of elements.)

In this brief, we have tried to highlight the appropriate measures to avoid it or at least reduce the various specific risks of dust, accidents occurring in the food industry (flour mills and / or semolina) and finally their consequences.

Keywords: Pollution, Dust, flour mills, semolina, Fire, Explosion

ملخص

يتطلب إنتاج المواد الغذائية الدقيقة مرورها بعملية الطحن، هذه الأخيرة تُنتج انبعاث غبار والذي يرافق جميع مراحل الإنتاج من التنظيف إلى التخزين إلى النقل حتى بيع المنتج.

يُعدّ التلوث الناجم عن الغبار المنبعث من التلوثات المستعصية في العالم يهدد حياة الإنسان بالدرجة الأولى.

وللوقاية والحد من الانبعاث نستعمل الأجهزة والآلات الخاصة بالتقاط و تنقية الهواء من حبيبات المادة المنبعثة.

لكن بالرغم من استعمال هذه الأجهزة و التقيد بقوانين السلامة المهنية إلا أن هذا القطاع لا يزال يعاني من المخاطر و الكوارث المادية والبشرية، و يتصدرها خطر الانفجار.

المحددة المخاطر تقليل الأقل على أو لتجنبه المناسبة التدابير على الضوء تسليط حاولنا المذكرة، هذه في وأخيراً) الصلب أو / و اللين الدقيق مطاحن(الأغذية صناعة في تحدث التي والحوادث للغبار المختلفة عنه الآثار الناجمة

انفجار ، حريق ، الصلب القمح ، الدقيق مطاحن ، غبار ، تلوث :المفتاحية الكلمات

LISTE DES FIGURES

N°	DESIGNATIONS	PAGE
CHAPITRE I : PROCEDE TECHNOLOGIQUE/ GRAIN DE BLE.		
I.1	Différentes étapes de Domestication du blé	4
I.2	Introduction de Domestication du blé	4
I.3	Isolement et Domestication	5
I.4	Croisement naturel de deux graminées sauvages	5
I.5	Sélection des blés les plus adéquates à la culture	6
I.6	Naissance du blé tendre	6
I.7	Sélection des blés de manière artificielle=Domesticati	7
I.8	Composition du grain de blé	10
I.9	Diagramme de nettoyage / Conditionnement du blé pour la mouture	13
I.10	Planchister	17
I.11	Planchister carré	17
I.12	Broyage, Claquage et Convertissage	19
I.13	Positionnement des crocs des cylindres dans la progression de la mouture	20
I.14	Meule de pierre	20
I.15	Meule de types SODER	22
I.16	Diagramme de Disposition des meules dans un moulin	22
I.17	Diagramme explicatif des planchisters	23
I.18	Influence du Blutage sur les qualités nutritionnelles des Farines	26
CHAPITRE II : NOTION SUR LES POUSSIÈRES		
II.1	Représentation granulométrique	31
II.2	Représente la pénétration des particules dans l'appareil respiratoire.	45
II.3	Fiche d'information Réponses intitulée comment les matières particulaires passent-elles dans l'appareil respiratoire	64
II.4	Courbe de déposition des particules dans les voies respiratoires en fonction de leur diamètre aérodynamique	66
CHAPITRE III : NOTIONS SUR ASPIRATION DE POUSSIÈRES		
III.1	Bande transporteur	71
III.2	Buse pour traitement des poussières	72
III.3	Gaine d'aspiration.	73
III.4	Contraction de la veine d'air à l'entrée d'un système	74
III.5	Relation entre le coefficient de contraction et le coefficient K de perte de charge à l'entrée d'un système	75
III.6	Représentation Schématique du Filtre à Manches	76
III.7	Autre représentation Schématique du Filtre à Manches	76
III.8	Filtre à manche	77
III.9	Représentation Schématique du Cyclone	78

III.10	Schéma de principe d'une chambre à poussière	80
CHAPITRE V : NOTIONS SUR LES EXPLOSION DES POUSSIÈRES / MESURES DE PREVENTION ET MISE EN PLACE DE PROTECTION		
V.1	Vitesse maximale de la montée en pression.	109
V.2	Schéma du récipient de 1 m ³	111
V.3	Déroulement schématique du test de détermination de l'explosivité des poussières en récipient de 1 m ³	112
V.4	Hexagone de l'explosion	127
CHAPITRE VI : ETUDE D'UN CAS : EXPLOSION D'UN SILO DE CEREALES ABLAYE (ENJUILLET 1998)		
VI.1	Vue du silo vertical avant l'accident	140
VI.2	Schéma d'implantation des différents bâtiments et installations (Schéma non à l'échelle)	141
VI.3	Repérage des unités de stockage mis en place par la SEMABLA	142
VI.4	Schéma de positionnement des principaux équipements dédiés à la manutention des céréales	143
VI.5	Vue du silo vertical après l'explosion	145
VI.6	Parcours supposé de l'explosion	148

LISTE DES TABLEAUX

N°	DESIGNATIONS	PAGE
CHAPITRE I : PROCEDE TECHNOLOGIQUE/ GRAIN DE BLE.		
I.1	Le syndrome de domestication du blé	8
I.2	Caractéristiques et carte d'identité du blé	9
I.3	Composition chimique du blé et de ses composants	11
I.4	Caractéristiques des farines de passages: (Pourcentages / matière sèche)	24
I.5	Taux d'extraction et type de farine	24
I.6	Qualités technologiques	25
I.7	Composition Chimique de la farine	28
CHAPITRE II : NOTION SUR LES POUSSIÈRES		
II.1	Vitesse de chute en fonction de la dimension des particules	37
II.2	Caractéristiques des poussières de céréales	39
II.3	L'affection due à l'exposition aux poussières de la farine	61
II.4	Affections respiratoires professionnelles de mécanisme allergique	62
CHAPITRE III : NOTIONS SUR ASPIRATION DE POUSSIÈRES		
III.1.A	Distance parcourue en fonction de la vitesse de chute	70
III.1.B	Distance parcourue en fonction de la vitesse de chute	71
III. 2	Exemples types de Condition de disposition du contaminant en rapport de la Vitesse de captage née	72
CHAPITRE IV : IDENTIFICATION DES PRINCIPAUX RISQUES DANS LES MINOTERIES ET SEMOULERIES, MESURES DE PREVENTION ET MISE EN PLACE DES MOYENS DE PROTECTION		
IV.1	Classement similaire au classement des zones concernées par le risque d'explosion de substances inflammables (gaz, vapeur, brouillard)	100
IV.2	Appareils installés dans les zones	100

LISTE DES ABREVIATIONS

Abréviation	Signification
VLE	Valeur Limite d'Exposition
PM	Particulate Matter
MEB	Microscope électronique à balayage
MAT	Matières Azotées totales
MPB	Matières Protéiques Brutes
VME	Valeur moyenne d'exposition
ANMF	Association nationale de la meunerie française
AFNOR	Association nationale de normalisation
ONU	Organisation des nations unies
ADEME	Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie
P_{max}	Pression maximale
LIE	Limite inférieure d'explosivité
LSE	Limite supérieure d'explosivité
ATEX	Atmosphère explosive
INRS	Institut national de la recherche scientifique
INERIS	Institut national de l'environnement industriel et des risques
PCS	Pouvoir calorifique supérieur
EMI	Energie minimal d'inflammation
TAI	Temps d'auto inflammation
CHSCT	Comité d'hygiène, de sécurité et des conditions de travail

SOMMAIRE

RESUME

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES ABREVIATIONS

INTRODUCTION GENERALE.....1

CHAPITRE I : PROCÉDÉ TECHNOLOGIQUE/ GRAIN DE BLE

I-1. INTRODUCTION.....	3
I-2. HISTOIRE DU BLE.....	3
I-3. NOTIONS SUR LE GRAIN DE BLE.....	7
I-3-1. Définitions.....	7
I-3-2. Carte d'identité de l'aliment.....	8
I-3-3. Structure et la composition du grain de blé.....	8
I-3-4. Différents types de blé.....	10
I-3-5. Contre-indications.....	10
I-4. NETTOYAGE ET PREPARATION DU BLE ALA MOUTURE.....	10
I-4-1. OPERATIONS DU NETTOYAGE DU BLE.....	10
I-4-2. Préparation du blé a la mouture.....	11
I-5. MOUTURE DU BLE.....	14
I-5-1. Principe de la mouture.....	14
I-5-2. Phases de la mouture.....	14
I-5-3. Types de mouture.....	14
I-5-4. Techniques de mouture.....	15
I-5-4-1. Mouture du grain de blé sur cylindres métalliques.....	15
I-5-4-2. Terminologie de certains termes essentiels et différentes étapes de la mouture sur cylindres.....	15
I-5-4-3. Mouture sur meules de pierre.....	18
I-5-4-4. Meules du type « SODER ».....	19
I-5-4-5. Planchisters.....	21
I-6. CARACTERISTIQUES DES FARINES DE PASSAGES : (POURCENTAGES / MATIERE SECHE).....	22
I-7. DIFFERENTS PRODUITS RENCONTRES AU COURS DE LA MOUTURE.....	22
I-8. INFLUENCE DU BLUTAGE SUR LES QUALITES NUTRITIONNELLES DES FARINES.....	23
I-9. NOTION DE VALEUR MEUNIERE.....	23
I-10. QUALITES TECHNOLOGIQUES.....	24
I-11. QUELQUES NOTIONS SUR LA FARINE.....	24
I-11-1. DEFINITION.....	24
I-11-2. COMPOSITION CHIMIQUE DE LA FARINE.....	25
I-12. CONCLUSION.....	25

CHAPITRE II : NOTIONS DE POLLUTION ENGENDREE PAR LES POUSSIÈRES

PREMIERE PARTIE : NOTIONS SUR LES POUSSIÈRES

II-1. INTRODUCTION.....	26
II-2. GENERALITES ET DEFINITIONS.....	26
II-2-1. Généralités	26
II-2-2. Définitions.....	37
II-3. DIFFERENTS TYPES ET ORIGINES DES POUSSIÈRES.....	28
II-3-1. Origines des poussières.....	28
II-3-1-1. Origine naturelle	28
II-3-1-2. Origine mécanique.....	28
II-3-2. Les types de poussières	30
II-4. PROPRIETES PHYSIQUES DE LA POUSSIERE	32
II-5. CARACTERISTIQUES DES POUSSIÈRES DE GRAIN DE BLE.....	36
II-5-1. Détermination de la teneur en eau	36
II-5-2. Détermination de la teneur en cendre	37
II-5-3. Détermination de la teneur en protéine.....	47
II-5-4. Détermination de la teneur en amidon.....	38
II-5-5. Détermination de la teneur en gluten.....	38
II-6. COMPOSITION CHIMIQUE DES POUSSIÈRES	39
II-7. SANTE ET SECURITE PUBLIQUE PAR LA POUSSIERE EN SUSPENSION DANS L' AIR.....	41
II-7-1. Dangers en fonction du site de dépôt.....	42
II-7-2. Maladies liées aux opérations soulevant de la poussière.....	43
II-8. CONCLUSION	46

DEUXIEME PARTIE : NOTIONS SUR LA POLLUTION

II-9. INTRODUCTION.....	47
II-10. DEFINITION DE LA POLLUTION	47
II-11. HISTOIRE DE LA POLLUTION	49
II-11. IMPORTANCE ECONOMIQUE DU BLE.....	50
II-10-1. Cas de l'Algerie.....	51
II-11. CLASSIFICATION DES POLLUTIONS SELON LES SOURCES	51
II-11-1. Pollution agricole.....	51
II-11-2. Pollution biologique	52
II-11-3. Pollution maritime	52

II-11-4. Pollution par les déchets solides.....	53
II-11-5. Pollution par les déchets domestiques	53
II-11-6. Pollution liée aux transports.....	53
II-11-7. Pollution d'origine naturelle	54
II-11-8. Pollution industrielle.....	54
II-11-8-1. Formes des rejets industriels	54
II-13. EFFETS DE LA POLLUTION CAUSEE PAR LA POUSSIÈRE	56
II-13-1. Introduction.....	56
II-13-2. Pollution atmosphérique	56
II-13-3. Pollution minérale des eaux	57
II-13-4. Effets sur la santé humaine	57
II-13-4-1. Microflore des poussières respirées dans les silos.....	57
II-13-4-2. Farine	58
II-13-4-3. Asthme professionnel.....	58
II-13-4-4. Affections respiratoires professionnelles de mécanisme allergique.....	59
II-13-5. Sur les végétaux	59
II-13-6. Sur les conditions générales du confort et sur les matériaux	59
II-14. COMPORTEMENT ET MOYENS DE DEFENSE.....	60
II-15. RETENTION DES PARTICULES DE POUSSIÈRES DANS LES VOIES RESPIRATOIRES	62
II-16. CONCLUSION	62

CHAPITRE III : NOTIONS SUR L'ASPIRATION DE POUSSIÈRES

III-1. INTRODUCTION	63
III-2. GENERALITES SUR L'EXPOSITION AUX POUSSIÈRES.....	63
III-3. DEPOUSSIERAGE	64
III-4. CAPTAGE.....	66
III-4-1. Définition et principe.....	66
III-4-2. Captation de la source de poussières	66
III-4-3. Buses de captage	68
III-5. RESEAUX D'ASPIRATION D'AIR POUSSIÈREUX.....	69
III-6. TRANSPORT DE L'AIR EMPOUSSIERE.....	69
III-6-1. Gaines d'aspiration.....	69
III-6-2. Capots.....	70
III-6-2-1. Définition	70
III-6-2-2. Conception du capotage.....	70

III-6-2-3. Coefficient de contraction ou perte de charge du capotage	70
III-7-1. Cas des filtres à manches utilise dans le secteur agro- alimentaire	71
III-7-2.CYCLONES.....	74
III-8. RECUPERATION DE LA POUSSIERE	75
III-9. CONCLUSION.....	76

**CHAPITRE IV : IDENTIFICATION DES PRINCIPAUX RISQUES
SPECIFIQUES AUX POUSSIÈRES DANS LES MINOTERIES ET
SEMOULERIES**

IV-1. INTRODUCTION	78
IV-2. PRINCIPAUX RISQUES DANS LES MINOTERIES ET SEMOULERIES	79
IV-2-1. Introduction	79
IV-2-2. Origines des accidents.....	80
IV-2-3. Risques lies aux machines	83
IV-2-4. Risques spécifiques lies aux poussières	83
IV-2-4-1. Généralités	83
IV-2-4-2. Risques lies aux stockages.....	84
IV-2-4-3. Risques d'incendie et d'explosion.....	86
IV-2-4-3-1. Introduction	86
IV-2-4-3-2. Risque incendie.....	87
IV-2-4-3-2-A. Généralités sur l'incendie.....	87
IV-2-4-3-3. Risque d'explosion des poussières.....	91
IV-2-4-3-3-A. Définition de poussière.....	91
IV-2-4-3-3-B. Paramètres lies aux poussières et aux process.....	91
IV-2-4-3-3-C. mesures de maîtrise des risques d'explosion	95
IV-2-4-3-4. Risques chimiques.....	98
IV-2-4-3-5. Risques toxiques	99
IV-2-4-3-6. Risques allergiques	99
IV-2-4-3-7. Autres risques non spécifiques	99
IV.3 CONCLUSION.....	100

**CHAPITRE V : NOTIONS SUR LES EXPLOSIONS DES POUSSIÈRES /
MESURES DE PREVENTION ET MISE EN PLACE DE PROTECTION**

V-1. INTRODUCTION	101
V-2. HISTORIQUE	101
V-3. QUELQUES DEFINITIONS IMPORTANTES	104
V-3-1. Point de rupture.....	104
V-3-2. Température d'inflammation	104
V-3-3. Energie minimale d'inflammation « EMI ».....	104
V-3-4. Concentration explosive	105
V-3-5. Pouvoir calorifique supérieur.....	105
V-3-6. Indice d'explosion	105
V-3-7. Taux d'humidité.....	106
V-3-8. Vitesse maximale de montée en pression « Kst » et pression maximale « P _{max} ».....	106
V-3-9. Température d'auto inflammation -nuage- « TAI ».....	106
V-3-10. Température d'auto inflammation-couche- « TAI »	107
V-3-11. Limite d'infériorité d'explosivité « LIE »	107
V-4. LOI CUBIQUE	107
V-5. STOCKAGE ET TRANSPORT DES PRODUITS AGRO-ALIMENTAIRES.....	109
V-5-1. Généralités	109
V-5-2. Silos de stockage.....	111
V-5-3. Activité de stockage « types de cellules ou de capacités de stockage ».....	113
V-5-4. Tours de manutention.....	115
V-5-5. Galeries de manutention	116
V-5-6. Ventilation	116
V-6. NOTIONS SUR L'EXPLOSION DES POUSSIÈRES	116
V-6-1. Définition de l'explosion	116
V-6-2. Généralités sur l'explosion.....	117
V-6-3. Propagation de l'explosion.....	118
V-6-4. Déroulement d'une explosion de poussières.....	118
V-6-4-1. Origines de déclenchement des explosions.....	118
V-6-4-2. Conditions nécessaires pour l'explosion.....	123
V-6-5-1. Présence d'oxygène	123
V-6-5-2. Poussières combustibles	123
V-6-5-3. Mise en suspension.....	123
V-6-5-4. Domaine d'explosivité.....	124

V-6-5-5 Source d'inflammation.....	124
V-6-5-6. Confinement	124
V-6-4-3. Types d'explosions de poussières.....	125
V-6-4-4. Conséquences d'une explosion	125
V-7. MESURES DE PREVENTION DANS LES MINOTERIES ET SEMOULERIES.....	126
V-7-1. Introduction.....	127
V-7-2. Prevention des incendies et des explosions / maitrise de l'empoussièrement.....	127
V-7-2-1. Mesures de prévention.....	127
V-7-2-2. Autres mesures de prévention	130
V-7-3. Moyens de protection.....	131
V-8. CONCLUSION.....	133

CHAPITRES VI : ETUDE D'UN CAS : EXPLOSION D'UN SILO DE CEREALES ABLAYE (ENJUILLET 1998)

VI-1. HISTORIQUE DE L'ACCIDENT.....	134
VI-2. PRINCIPALES CARACTERISTIQUES DES INSTALLATIONS	134
VI-2-1. Site semabla et son environnement	134
VI-2-2. Description des installations de la semabla	135
VI-2-3. Description du silo vertical.....	136
VI-3. DOMMAGES OBSERVÉS ET CONSTATS.....	138
VI-3-1. Bilan humain	138
VI-3-2. Dommages matériels	139
VI-3-2-1. Dommages aux installations semabla	139
VI-3-2-2. Dommages aux tiers.....	140
VI-3-2-3. Autres dommages	140
VI-3-3. Projectiles	141
VI-3-4. Constats relatifs à l'activité au moment du sinistre.....	141
VI-4. SCÉNARIOS ENVISAGEABLES, RECHERCHE DES CAUSES	142
VI-4-1. Contexte d'exploitation du silo	142
VI-4-2. Déroulement du phénomène d'explosion.....	142
VI-4-3. Recherche des causes du sinistre	144
VI-5. ENSEIGNEMENTS ISSUS DE L'ANALYSE DE L'ACCIDENT	145
VI-6. RESUME ET SUGGESTIONS SUR LE SINISTRE.....	147
CONCLUSION GENERALE.....	148
RECOMMANDATIONS/SUGGESTIONS	149
BIBLIOGRAPHIE	
ANNEXES	

INTRODUCTION GENERALE

Pour les industriels, garantir la qualité de l'air ambiant sur leurs sites de production est indispensable. Or, beaucoup de procédés, impliquant la manipulation de poudres et produits secs produisent des poussières et émettent des substances polluantes, toxiques ou explosives.

Filtrer l'air ambiant est donc essentiel pour préserver la santé des employés, protéger l'outil de production, éviter les contaminations et préserver l'environnement. Si la question du dépoussiérage industriel est transverse, chaque secteur d'activité a ses spécificités et ses contraintes.

Les secteurs de l'agriculture et de l'agroalimentaire ont très largement recours à des dispositifs de filtration pour dépoussiérer l'air ambiant avec plusieurs objectifs, à savoir :

- Limiter la perte de matière utile ;
- Prévenir les contaminations croisées,
- Garantir le respect strict des réglementations sanitaires relatives aux denrées alimentaires ;
- Préserver la qualité de l'atmosphère dans laquelle évoluent les opérateurs ;
- Récupérer des déchets ;
- Éviter la survenue d'atmosphères potentiellement explosives ...

Dans le secteur agricole, c'est surtout le secteur céréalière et celui des semences qui sont les plus concernés.

Dans l'agroalimentaire, ce sont notamment les usines qui transforment et conditionnent les céréales, les épices, les fèves de cacao ... qui sont également concernés les émissions des poussières

Les solutions de dépoussiérage reposent, selon le cas, sur des dépoussiéreurs encastrables ou des dispositifs à manche.

Les explosions de poussières, dans l'industrie en général et dans l'industrie agro-alimentaire en particulier, sont loin de représenter un phénomène nouveau ; elles ont attiré, depuis longtemps l'attention des industriels et ont fait l'objet de nombreux travaux pour tenter d'expliquer leurs causes et rechercher les moyens de les éviter.

Dans l'industrie, toute installation où les poussières inflammables sont produites ou mises en œuvre, peut être soumise à un risque d'explosion de poussières sous certaines conditions de concentration en présence d'une source d'inflammation.

Les effets de l'explosion dus à l'augmentation de la pression peuvent être limités, et conduisent à des dégâts dans l'installation.

Mais quelquefois, les dépôts de poussières inflammables peuvent être soulevés par les effets de souffle et engendrent une première explosion ("explosion primaire") et générer une, voire plusieurs "explosions secondaires" qui sont susceptibles de provoquer des dégâts considérables conduisant à une destruction totale des installations industrielles et entraîner des dommages graves aux travailleurs.

C'est particulièrement le cas pour l'industrie agro-alimentaire, où la plupart des catastrophes qui ont eu lieu n'ont pas été produites par une seule explosion, mais deux ou plusieurs explosions successives qui ont atteint une grande partie des zones "empoussiérées", même celles où les poussières n'étaient préalablement pas en suspension dans l'air.

L'industrie agro-alimentaire est confrontée également à des incendies impliquant les matières stockées, dont les conséquences ne sont toutefois pas généralement aussi dramatiques pour les personnes que celles des explosions mais qui conduisent parfois à la destruction complète des installations.

Les incendies résultent de la combustion de produits agro-alimentaires ou d'autres matières constitutives des bâtiments et d'appareils qui peuvent aussi s'enflammer ou contribuer de façon significative au développement d'un incendie.

«L'homme et sa sécurité doivent constituer la première préoccupation de toute aventure technologique. N'oubliez jamais cela quand vous vous plongez dans vos croquis et vos équations. »

Albert Einstein

CHAPITRE I : PROCÉDÉ TECHNOLOGIQUE / GRAIN DE BLE

I-1. INTRODUCTION

Le blé demeure la céréale la plus consommée de façon directe par les hommes dans le monde et la plus échangée sur les marchés internationaux. Il appartient à la famille des Poacées (anciennement Graminées). Originaire des steppes semi-arides du Proche-Orient, il est étroitement associé aux peuples méditerranéens et européens. Sa culture remonte à 8000-7000 avant J.-C. Elle s'étend aujourd'hui, grâce à la diversité des variétés cultivées, sous les latitudes tempérées des deux hémisphères. Produit dans des contextes agronomiques, économiques, sociaux et politiques très divers, le blé présente des rendements à l'hectare, et encore davantage par unité de main-d'œuvre, très contrastés. Ces disparités ne manquent pas de poser problème lorsque les producteurs se trouvent confrontés, de façon plus ou moins directe en fonction des protections ou soutiens divers dont ils bénéficient, avec le cours « mondial » du blé. Le prix du blé sur le marché a cependant doublé depuis 2006, ce qui constitue un handicap pour les pays importateurs.

Le blé est principalement consommé directement par les humains (80% de la production mondiale) sous forme de pains, galettes, pâtes, biscuits, semoules... Il sert également à quelques utilisations industrielles et en alimentation animale. Cette céréale demeure très peu utilisée pour produire de l'éthanol. Contrairement au maïs, il n'existe pas encore de variétés génétiquement modifiées mises à la disposition des agriculteurs. [1]

I-2. HISTOIRE DU BLE

Les premières cultures de blé sont apparues il y a 10 000 ans, au sud-est de la Turquie. Le blé d'alors, l'engrain (*Triticum monococcum*), correspond génétiquement à une plante diploïde, c'est-à-dire contenant deux exemplaires de chaque chromosomes.

La domestication du blé amidonnier (*Triticum dicoccum*) a également débuté à la même époque.

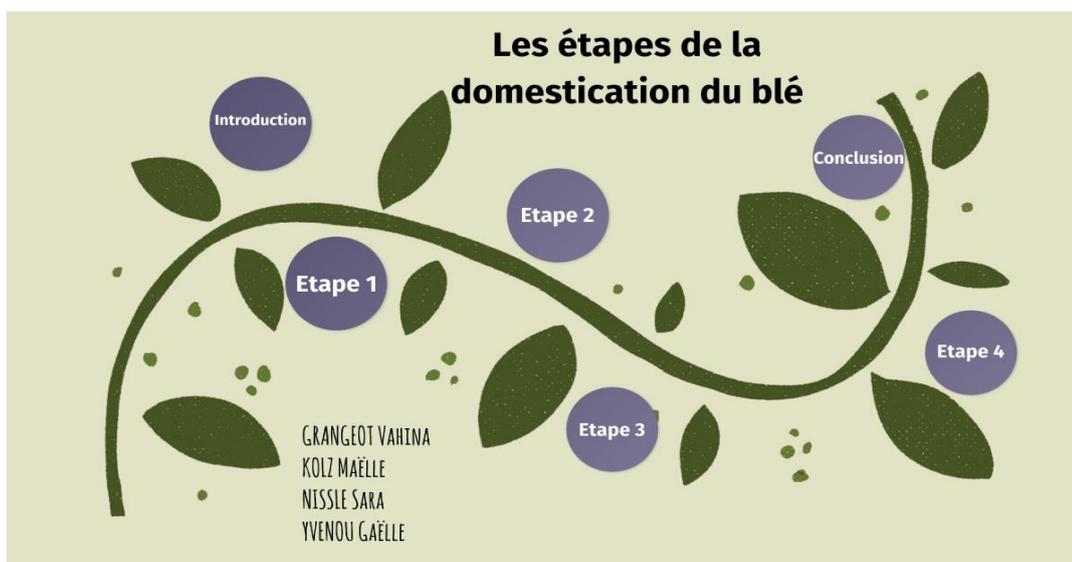


Figure I.1 : Différentes étapes de Domestication du blé

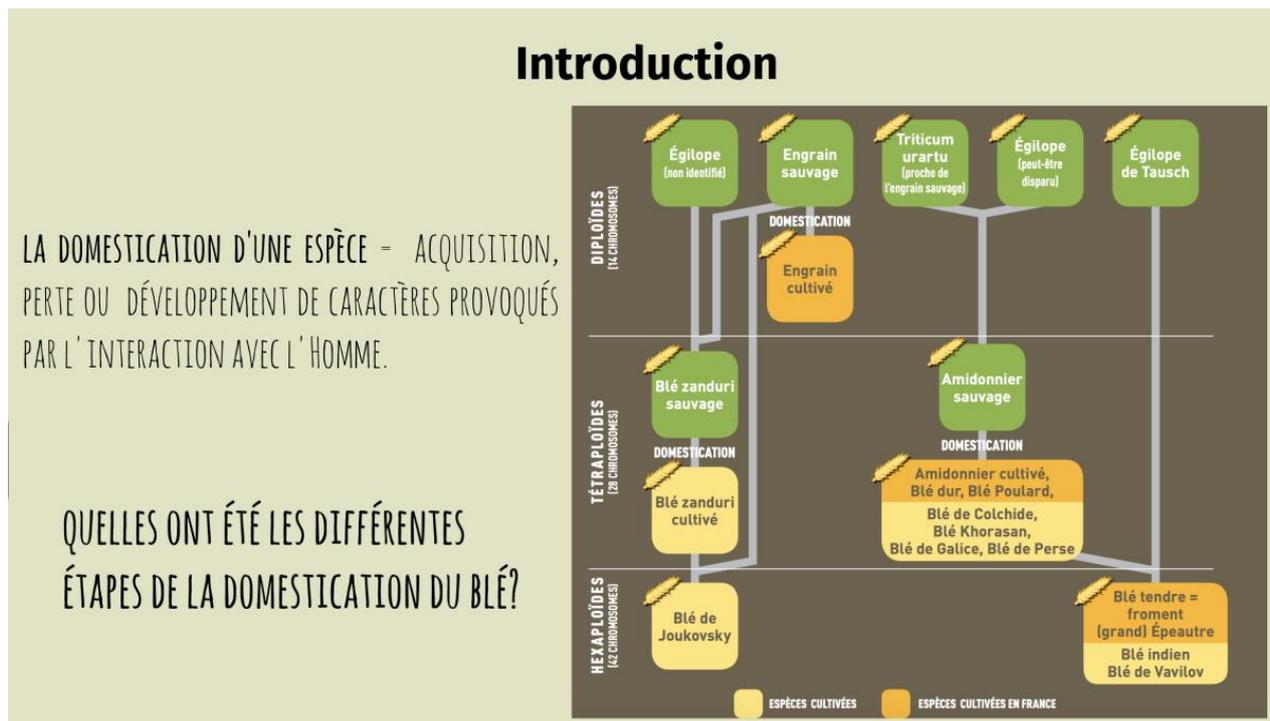


Figure I.2 : Introduction de Domestication du blé

Etape 1 : isolement et domestication

- les humains collectent des graminées sauvages
- ils sélectionnent les plantes avec le meilleur rendement
- le petit épeautre a désormais besoin de l'humain pour être cultivé

Petit Épeautre

© Elise Demeulenaere

Figure I.3 : Isolement et Domestication

Etape 2 : croisement naturel de deux graminées sauvages

Amidonnier
= 28 chromosomes
= deux fois plus que ses parents

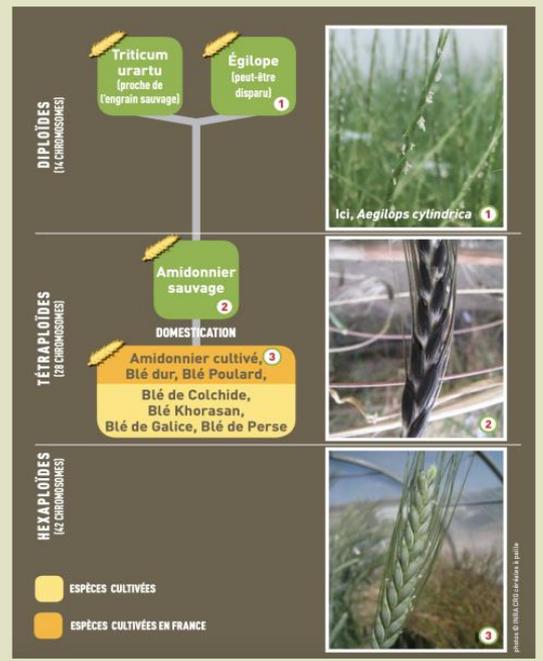


Figure I.4 : Croisement naturel de deux graminées sauvages

Etape 3 : sélection des blés les plus adéquates à la culture

- décorticage minutieux
- sélection pour ne conserver que les plantes dont le grain perdait son enveloppe externe
- isolement des blés mutants dits à « grains nus »

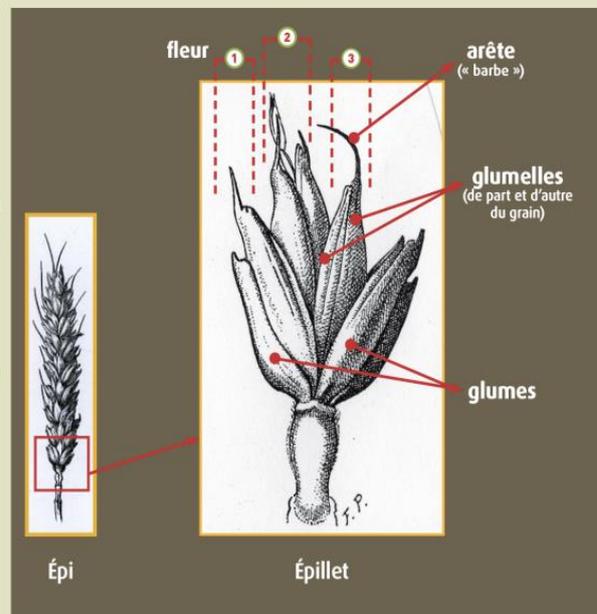


Figure I.5 : Sélection des blés les plus adéquates à la culture

Etape 4 : naissance du blé tendre

- amidonnier s'est croisé avec une graminée sauvage -> naissance du groupe des blés à 42 chromosomes, communément appelé froment ou blé tendre

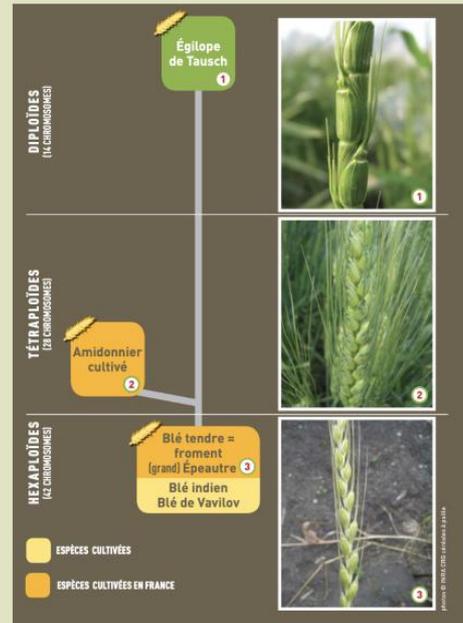


Figure I.6 : Naissance du blé tendre

Conclusion

- ESPÈCES DE BLÉS CULTIVÉES ONT ÉTÉ SÉLECTIONNÉES ARTIFICIELLEMENT À PARTIR DES ESPÈCES SAUVAGES = DOMESTICATION
- SÉLECTION MASSALE
- MÉCANISME DE DOMESTICATION EST SOUVENT DÉFAVORABLE À LA VIE DE LA PLANTE

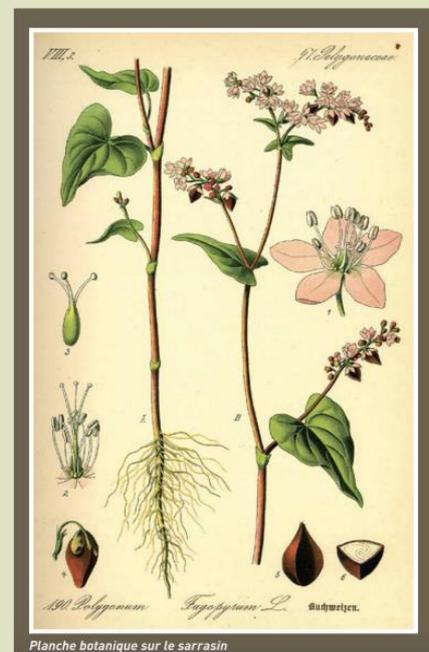


Figure I.7 : Conclusion de la domestication

Tableau I.1 : Caractéristiques d'espèces cultivées

Caractère	Engrain et amidonnier (sauvages)	Blé dur et blé tendre (cultivés)
Solidité de l'épi	Rachis très fragile → dissémination des grains facilitée	Rachis solide → récolte facilitée
Forme des grains à maturité	Vêtus → les glumelles protègent le grain	Nus → séparation grains/ glumelles et formation de farine facilitée
Maturation des grains des différents individus	Étalée dans le temps → probabilité de rencontrer des conditions favorables pour la maturation augmentée	Synchrone → récolte facilitée

4 **Le syndrome de domestication du blé.** On qualifie de syndrome de domestication l'ensemble des caractères qui distinguent une espèce cultivée des espèces sauvages proches.

Issu de l'hybridation naturelle de deux graminées sauvages diploïdes, le *Triticum urartu* proche de l'engrain sauvage (*Triticum boeoticum*) et une variété d'égilope (*Aegilops*), ce nouveau blé est tétraploïde, c'est-à-dire qu'il comporte quatre exemplaires de chromosome. Il est donc génétiquement plus évolué. À l'instar de l'amidonnier, le blé dur est également un hybride naturel tétraploïde.

Au fil du temps, les agriculteurs ont continué à sélectionner dans leurs champs les blés aux qualités les plus avantageuses (facilité de récolte, meilleur rendement, etc.). De nouvelles espèces de blé sont ainsi devenues dominantes, notamment l'épeautre et le froment qui résultent eux aussi d'un croisement naturel entre le blé amidonnier et une égilope sauvage (*Aegilops tauschii*). Ils sont devenus des blés hexaploïdes, contenant six exemplaires de chromosomes (soit un total de 42), quelque peu différents de leurs ancêtres à 14 chromosomes.

Cette évolution génétique « naturelle », quoiqu'extrêmement fructueuse, s'est déroulée sur plusieurs milliers d'années. La biotechnologie explore désormais des moyens d'accélérer les processus de gestion génétique et d'améliorer leur efficacité par le biais de manipulations des gènes hautement ciblées [2].

I-3. NOTIONS SUR LE GRAIN DE BLE

I-3-1. DEFINITIONS

Par définition du « **Blé** » : C'est un terme générique qui désigne plusieurs céréales appartenant au genre *Triticum*. Ce sont des plantes annuelles aux racines fibreuses à tiges hautes et généralement creuses, portant des nœuds d'où portent des feuilles, des sommets de la tige portent une grappe des fleurs qui se transforment en grains et de la famille des graminées ou Poacées, cultivées dans de très nombreux pays. Le mot « blé » désigne également le « grain » (caryopse) produit par ces plantes.

Le grain de blé mesure de 4.8 mm à 9.5 mm de long, selon les variétés et le degré de maturité, sa forme varie de sphérique à allongée, sa surface est parcourue d'un sillon longitudinal dont la profondeur atteint près de la moitié l'épaisseur du grain, de la famille des graminées ou Poacées, cultivées dans de très nombreux pays. Le mot « blé » désigne également le « grain » (caryopse) produit par ces plantes.[3][7]

I-3-2. CARTE D'IDENTITE DE L'ALIMENT

Tableau I.2 : Caractéristiques et carte d'identité du blé

Carte d'identité de l'aliment		Caractéristiques du blé	
Type	Céréale	Physique	nutritionnelle
Famille	Graminées	Longueur : 7 à 9 mm	Riche en fibre
Origine	Proche orient	Largeur : 3 à 4mm	Source de fer
Saison	Juillet	Epaisseur : 3 à 4 mm	Riche en vitamine du groupe B (B1, B3, B6)
Couleur	Jaune pâle	Poids : 30 à 50 mg	Source de vitamine E
Saveur	Douce		Source d'antioxydants [5]
Goût	Légèrement sucré et agréable		Composition chimique : La portion comestible du grain de blé comporte trois parties. l'essentiel du grain, que l'on nomme endosperme, est composé surtout d'amidon. son enveloppe, le son, représente près de 15% du poids du grain ; il est riche en nutriments et surtout en fibres (majoritairement insolubles) . Quant au germe, c'est l'embryon du grain ; il représente moins de 3% du poids du grain. Malgré sa très petite taille, le germe est la partie la plus riche en éléments nutritifs. son contenu en lipides le rend facilement périssable [4].
Aspect	Jaune pale et d'un ovale connu		

Le grain de blé constitue le fruit de la plante ; c'est un fruit sec qui contient à l'intérieur la graine proprement dite. Le grain de blé est de forme ovoïde, plus ou moins allongée ; son examen révèle :

- Une face dorsale plus ou moins bombée ;
- Une face ventrale comportant un sillon profond ;
- A sa partie supérieure, de courts poils ;
- A sa partie inférieure, visible sur la face dorsale, le germe.

I-3-3. STRUCTURE ET LA COMPOSITION DU GRAIN DE BLE

Quant à sa structure et sa composition, le grain de Blé comporte plusieurs parties, de nature différente, et que l'on peut classer en 3 groupes :

- Les enveloppes qui représentent 13 à 15% du poids du grain.
- L'amande, ou albumen amylicé, qui représente 82% à 85% du poids du grain.[6]

- Le germe, qui représente environ 3% du poids du grain [5].

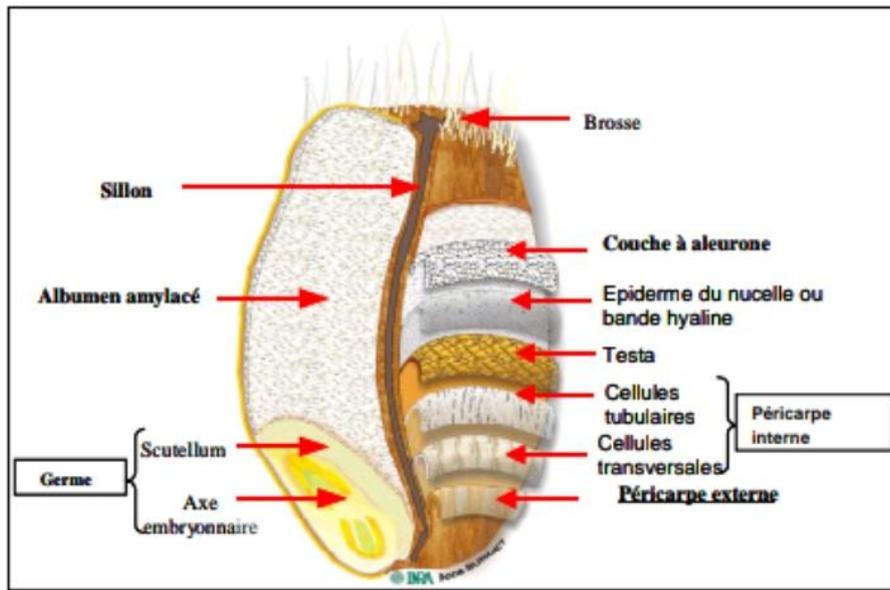


Figure I.8 : Composition du grain de blé

❖ Les enveloppes qui sont constituées par des couches de cellules superposées :

1- Péricarpe : Enveloppe de fruit qui comprend trois couches :

- Epicarpe ;
- Mésocarpe (cellules transversales) ;
- Endocarpe (cellules tubulaires).

2- Tégument séminal et la bande hyaline qui à eux deux constituent l'enveloppe de la graine.

3- Assise protéique, appelée aussi cellules à aleurone, qui botaniquement est la première couche de cellules de l'endosperme et est, de ce fait, différente des autres enveloppes.

Les enveloppes, au cours de la mouture, donneront le son.

❖ L'amande farineuse qui est considérée par des grains d'amidon, enchâssées dans le réseau d'un corps azoté, le gluten.

❖ Le germe, qui constitue la future plante, est un corps riche en sucre, en matières grasses et en vitamines (B & E).

Tableau I.3 : Composition chimique du blé et de ses composants

	Eau en %	Matières Minérales	Matières protéiques	Matières grasses	Glucides solubles	Glucides totaux
Blé entier	13	1,7 - 2,1	10 - 13	1,5 - 2	2 - 3	68 - 72
Enveloppe du grain	13	6 - 7	17 - 19	4 - 5	2 - 2,5	65 - 68
Amande farineuse	13	94 - 95	9 - 12	0,7 - 1	1,5 - 2	74 - 76
Germe	13	4 - 5	22 - 32	15 - 18	15 - 20	37 - 43

I-3-4. DIFFERENTES TYPES DE BLE

Il existe différents types de blé dont deux d'entre eux sont d'une importance réelle à l'heure actuelle :

▪ **Blé dur** est surtout cultivé dans les zones chaudes et sèches. Il est de forme effilée, une teneur protéique plus importante ainsi qu'un albumen de consistance cornée plus difficile à réduire en farine. Ce dernier est aussi plus riche en gluten, en lipide, en minéraux et en vitamines. Le blé dur est considéré comme étant le principal apport énergétique. Il est utilisé principalement pour la fabrication des semoules. Celles-ci sont utilisées dans la fabrication des pâtes alimentaires sèches et du couscous [8].

▪ **Blé tendre** ou froment, le plus important est cultivé dans les altitudes plus élevées (France, Canada, Ukraine). C'est un blé destiné à l'industrie de la meunerie et permet d'obtenir une farine de bonne qualité, dotée d'une aptitude pour la panification et contenant environ 8 à 10 % de gluten.

I-3-5. CONTRE-INDICATIONS

En ce qui concerne les contre-indications que présente le grain de blé, elles sont en nombre de trois et qui sont :

▪ **Gluten** : Le gluten est la principale protéine du blé et d'autres céréales. Son ingestion peut provoquer certains symptômes chez les gens atteints de la maladie cœliaque. Également connue sous le nom d'intolérance (ou entéropathie) au gluten

▪ **Allergie au blé** : Le blé figure sur la liste des principaux allergènes de l'Agence canadienne d'inspection des aliments (ACIA). Différente de l'intolérance au gluten, l'allergie au blé est une réaction anormale du système immunitaire aux protéines du blé. Les symptômes d'allergie au blé sont semblables à ceux d'autres allergies alimentaires. Elles peuvent être graves et aller jusqu'au choc anaphylactique.

▪ **Calculs urinaires** : Certaines personnes peuvent se voir recommander d'adopter une alimentation restreinte en oxalates afin de prévenir les récurrences de calculs rénaux ou urinaires (aussi appelés lithiases urinaires). Les oxalates sont des composés que l'on retrouve naturellement dans plusieurs aliments, dont le blé et particulièrement le son de blé [5].

I-4. NETTOYAGE ET PREPARATION DU BLE A LA MOUTURE

I-4-1. OPERATIONS DU NETTOYAGE DU BLE

Le nettoyage a pour but d'enlever du blé toutes les impuretés qui y sont présentes :

- Des corps étrangers tels que : De la paille, des balles, des pierres, des corps métalliques..... ;
- Des graines étrangères tels que :
 - Graines longues (orge, avoine...) ou rondes (vesces, nielles...) ;
 - Graines nuisibles par l'odeur ou la couleur (ail, mélilot, mélampyre)
 - Graines toxiques (nielle, liseron)
- Grains de blé malades : carie, rouille, charbon, **ergot** (dangereux pour l'homme);
- Grains attaqués par les insectes (charançon, punaise)
- Grains de blé cassés (contamination de l'amande qui est alors sans protection).

- Poussière qui est logée à l'intérieur du sillon ainsi que celle qui adhère à la brosse du grain :
 - Après réception au magasin, sont mélangés dans les boisseaux, lorsqu'au préalable, ils ne l'ont pas été dans les silos du stockage du moulin ;
 - Après la sortie du boisseau à blé sale, le blé est pesé au moyen d'une bascule automatique ;
 - Pesé, le blé est dirigé vers la première machine de nettoyage « Le séparateur-aspirateur ». Cette machine a pour but d'enlever les impuretés du blé qui sont de tailles nettement différentes ;
 - Après cette opération, le blé passe sur un dispositif bien connu sous le nom de « magnétique ». Le dernier, un aimant, retire du blé tous les corps métalliques qui seraient passés avec celui-ci au travers des tamis de séparateur ;
 - L'opération qui suit, l'une des plus importantes du nettoyage, est le « tirage ». Elle a pour but d'enlever les impuretés du blé qui ont le même diamètre que celui-ci mais dont la longueur est différente :

- Soient plus courtes telles que les graines rondes (vesces, nielles...) ;
- Soient plus longues telles que les graines d'avoine, d'orge....

○ Et après l'étape de tirage, le blé subit l'opération de brossage et dans le sillon. Cette opération est réalisée par la brosse à blé. Dans cette machine, le grain est roulé entre une paroi métallique, généralement en tôle perforée et des brosses qui sont fixées sur un arbre tournant. De la poussière est détachée du grain et aspirée à travers la tôle au moyen d'un aspirateur qui refoule l'air dans un cyclone ou un filtre ;

○ Le nettoyage du blé est souvent complété par le lavage, opération qui peut être considérée également comme la première phase de la préparation du blé.

En résumé, les différentes étapes de nettoyage sont :

- ✓ Séparation magnétique, pour éliminer les débris métalliques ;
- ✓ Séparation par calibrage, pour éliminer les graines plus grosses, et plus petites que le blé ;
- ✓ Trieurs à disques, pour éliminer les graines longues et les graines rondes ;
- ✓ Epierrage.

A ce stade se termine le nettoyage à sec.

Le blé nettoyé et sec peut être stocké en silos, et conservé pendant plusieurs mois.

Avant la mise en mouture le blé subit un conditionnement, qui permet d'humidifier les enveloppes du blé, pour favoriser la séparation de celles-ci de l'amande du grain au cours de la mouture:

- Conditionnement : le blé est amené au degré d'humidité convenable.
- Brossage et Ventilation Tarare pour éliminer les poussières.

Le blé sain, ainsi nettoyé et conditionné est stocké dans des silos de repos, où il attend pendant 24 heures environ, d'être mis en mouture ;

Pour la mise en mouture, le blé propre humidifié, contient généralement 16 à 17% d'eau s'il est destiné à une mouture sur cylindres et environ 15% d'eau s'il est destiné à la mouture sur meules.

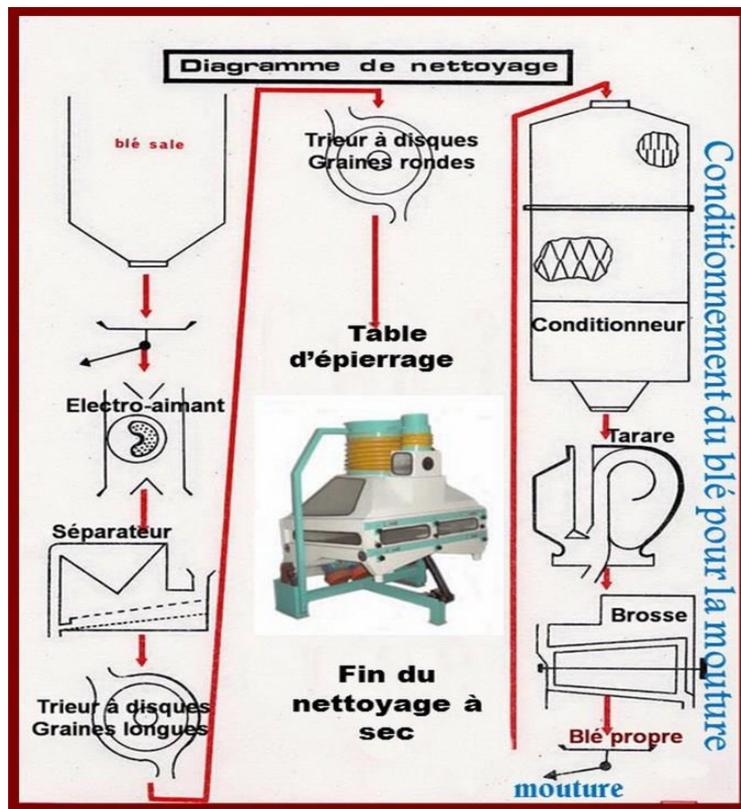


Figure I.9 : Diagramme de nettoyage / Conditionnement du blé pour la mouture

I-4-2. PREPARATION DU BLE A LA MOUTURE

Les lots de blé reçus au moulin contiennent des graines étrangères et des impuretés, mais dans une proportion tolérable qui permet le classement de celui-ci comme **Blé Sain, loyal et marchand**.

Cependant ils doivent subir des opérations de nettoyage avant d'aller en mouture, parallèlement aux opérations de nettoyage, le meunier prépare le blé à la mouture par des opérations de mouillage et de repos pour faciliter la séparation des enveloppes et de l'amande.[5]

La préparation du blé à la mouture répond à un double objectif, à savoir :

- En premier lieu, assouplir l'écorce du grain et faire en sorte que son humidité soit légèrement supérieure à celle de l'amande en vue de faciliter leur séparation afin que la farine soit enlevée des issus au maximum et qu'en outre de l'enveloppe « le son » ;
- En second lieu, amener l'amande farineuse dans un état physique telle que la réduction de en farine fine soit obtenue le plus rapidement possible.

Comme assez fréquemment, le blé, qui arrive au moulin, a une teneur en eau trop faible et ne se trouve pas, de ce fait, dans les conditions voulues ;

Il sera nécessaire de procéder à la préparation du grain et de se livrer à une double opération qui comprendra une addition d'eau ou de mouillage et un temps de repos ou encore un « conditionnement » :

- Le mouillage, qui doit porter le blé à une humidité de 16% à 16,5% après préparation, est réalisé par addition d'eau au blé ;

- Après avoir été mouillé, le blé doit subir un « temps de repos » afin que l'eau pénètre dans le grain et se répartisse dans l'amande farineuse. Lorsque le temps de repos a eu lieu dans les boisseaux de repos, le « lot de blé » y séjourne de dix huit heures à trente six heures ;

- Un nouveau brossage, identique à celui qui prend place après le tirage, vient immédiatement après le temps de repos ;

- Vient ensuite, avant sa mise en mouture, un deuxième pesage du grain, comme au début du nettoyage ;

- Pour finir, un magnétique est, en fin de circuit, utilisé comme dispositif de sécurité. Son rôle consiste à retenir toutes les pièces métalliques qui pourraient accidentellement se détacher des machines de nettoyage et causeraient de graves dommages aux appareils à cylindres.

Les lots de blé reçus au moulin contiennent des graines étrangères et des impuretés, mais dans une proportion tolérable qui permet le classement de celui-ci comme ***Blé Sain, loyal et marchand***.

Cependant ils doivent subir des opérations de nettoyage avant d'aller en mouture, parallèlement aux opérations de nettoyage, le meunier prépare le blé à la mouture par des opérations de mouillage et de repos pour faciliter la séparation des enveloppes et de l'amande [5].

Donc avant la mise en mouture le blé subit un conditionnement, qui permet d'humidifier les enveloppes du blé, pour favoriser la séparation de celles-ci de l'amande du grain au cours de la mouture:

- Conditionnement : le blé est amené au degré d'humidité convenable ;
- Brossage et Ventilation Tarare pour éliminer les poussières.

Le blé sain, ainsi nettoyé et conditionné est stocké dans des silos de repos, où il attend pendant 24 heures environ, d'être mis en mouture ;

Pour la mise en mouture, le blé propre humidifié, contient généralement 16 à 17% d'eau s'il est destiné à une mouture sur cylindres et environ 15% d'eau s'il est destiné à la mouture sur meules.

❖ IMPURETES DU BLE QUI PEUVENT ETRE PRESENTES :

- Graines étrangères
- Autres céréales (orge, seigle, avoine)
- Graines nuisibles par l'odeur ou la couleur (ail, mélilot, mélampyre)
- Graines toxiques (nielle, liseron)
- Grains de blé malades : carie, rouille, charbon, **ergot** (*dangereux pour l'homme*)
- Grains attaqués par les insectes (charançon, punaise)
- Grains de blé cassés (contamination de l'amande qui est alors sans protection).[5]

I-5. MOUTURE DU BLE

C'est la succession d'étapes qui transforme le blé en farine

Afin d'obtenir de la farine, la mouture du blé réalisée au moulin, est capitale. C'est le moment où le meunier élimine plus ou moins les enveloppes et le germe puis réduit l'amande farineuse « en poudre ».[5]

I-5-1. PRINCIPE DE LA MOUTURE

La mouture est le procédé employé afin de moudre les grains de céréales, en particulier, le blé, par cylindres ou par meules.[5]

Le but à atteindre par la mouture est l'obtention sous forme de farine, du maximum de l'amande farineuse présente dans le grain :

- Broyer progressivement le grain de telle sorte que les enveloppes de celui-ci soient les moins brisées possibles ;
- Nettoyer la face interne de ces enveloppes en essayant au maximum de garder leur intégrité ;
- Assurer progressivement la réduction des semoules plus ou moins vetues provenant du broyage.

I-5-2.PHASES DE LA MOUTURE

Les différentes phases de la mouture sont définies comme suit :

- Chaque stade de réduction (Broyage, Claquage, Convertissage) est suivi aussitôt par le classement en grosseur à l'aide du tamis, du produit venant d'être réduit : C'est le « **Blutage** »
- Chaque stade de réduction produit une certaine quantité de farine ;
- Le sassage et le claquage sont deux stades intermédiaires entre le broyage et le convertissage ayant pour but la purification et la transformation des semoules en produits très purs.

I-5-3.TYPES DE MOUTURE

Il existe 4 types de moutures :

1. **Mouture haute** : La mouture progressive automatique, par cylindres, est le procédé donnant les meilleurs résultats : on emploie un procédé de mouture haute consistant à « croquer » progressivement le grain entre des cylindres cannelés afin d'en libérer l'amande farineuse.

2. **Mouture basse** : Mouture effectuée en rapprochant les deux meules du moulin et permettant d'obtenir le maximum de farine

3. **Mouture en grosse (à la grosse)** : Mouture délivrant au boulanger la farine brute. Il est alors obligé à "bluter" afin de séparer de la fleur le son et le gruau.

4. **Mouture rustique** : Mouture blutée par un seul bluteau.[9]

I-5-4. TECHNIQUES DE MOUTURE

Il existe néanmoins plusieurs techniques de mouture :

1. La mouture sur cylindres
2. La mouture sur meule
3. Les planchisters

I-5-4-1. MOUTURE DU GRAIN DE BLE SUR CYLINDRES METALLIQUES

Avec le type de mouture sur cylindres (d'origine hongroise) on distingue :

- Les cylindres cannelés représentés par la **lettre « B »** pour **Broyage**
- Les cylindres lisses représentés par les **lettres « C1 »** pour **Claquage** et « C » pour **Convertissage**
- Les farines obtenues **lettre « F »**, à la suite des opérations de broyage, de claquage ou de convertissage sont dites farines de passage affectées de la lettre de l'appareil concerné. On parlera ainsi d'une Farine B1 ou d'une Farine C1.
- La dénomination « **Farine** » de froment ou de blé sans autre qualificatif, désigne exclusivement le produit pulvérulent obtenu à partir d'un lot de blé, sain loyal et marchand préparé pour la mouture et industriellement pur. (Code des Usages).
- La Farine panifiable T55 est donc le résultat de l'addition des différentes farines de passage.[5]

I-5-4-2. TERMINOLOGIE DE CERTAINS TERMES ESSENTIELS ET DIFFERENTES ETAPES DE LA MOUTURE SUR CYLINDRES

- Les farines désignées par la **lettre « F »**, obtenues à la suite des opérations de broyage, de claquage ou de convertissage sont dites farines de passage affectées de la lettre de l'appareil concerné. On parlera ainsi d'une Farine B1 ou d'une Farine C1.
- **La dénomination « Farine »** de froment ou de blé sans autre qualificatif, désigne exclusivement le produit pulvérulent obtenu à partir d'un lot de blé, sain loyal et marchand préparé pour la mouture et industriellement pur. (Code des Usages).
- La Farine panifiable T55 est donc le résultat de l'addition des différentes farines de passage.
- **Broyage** : Les Broyeurs (cylindres cannelés, tournant en sens inverse, avec une vitesse différentielle importante de 1/2,5) au nombre de 4 ou 5 ; se distinguent les uns des autres par l'écartement entre eux et par la finesse des cannelures ; C'est l'ensemble des appareils à cylindres canulés désignés par la lettre « B »
- **Blutage** : Après chaque passage on procède à un tamisage à l'aide de « planchisters » (voir figure).



Figure I.10 : Planchiters



Figure I.11 : Planchiters carre

➤ **Refus** : L'amande extraite après chaque opération de broyage est constituée de fractions grosses (fines, grosses semoules, et finots) et de fractions très fines pour les farines de passage ; C'est une opération qui classe la matière selon la grosseur des différentes particules : Ce qui passe à travers le tamis s'appelle par convention : **L'extraction** ; ce qui reste sur le tamis;

➤ **Claquage et Convertissage** : Les Claqueurs et les Convertisseurs sont des cylindres lisses tournant en sens inverse et pratiquement au contact l'un de l'autre. Ils ont une vitesse différentielle faible comprise entre 1/1,2 à 1/1,4. A la sortie du broyage, les grosses semoules sont envoyées vers les claqueurs et les fines semoules et les finaux sont dirigés vers les

convertisseurs. Le refus est envoyé au broyeur suivant. Pour un même blé, les caractéristiques qualitatives de la farine, résultant de la mouture sur cylindres, peuvent varier en fonction :

- De la préparation du blé
- Du réglage des cylindres ; des caractéristiques des cannelures des broyeurs et de leur positionnement ;
- Du choix des tamis (Planchisters) : En effet, le meunier choisit le positionnement des crocs des cylindres de même que leur profondeur dans la progression de la mouture.

Le Claquage et le Convertissage sont les deux phases de réduction des produits provenant du broyage ; les claqueurs sont désignés par la lettre Cl (Cl₁, Cl₂, Cl₃,...) et les convertisseurs, désignés par la lettre C (C₁, C₂, C₃,...), sont des appareils à cylindres lisses ;

➤ **Sassage** : C'est une opération intermédiaire entre le broyage et la première phase de réduction des produits de claquage. Son but est de purifier et de classer les produit allant au claquage ;

➤ **Curage des sons** : C'est une opération qui consiste à réduire au minimum la quantité d'amande adhérente sur la face intérieure des enveloppes.

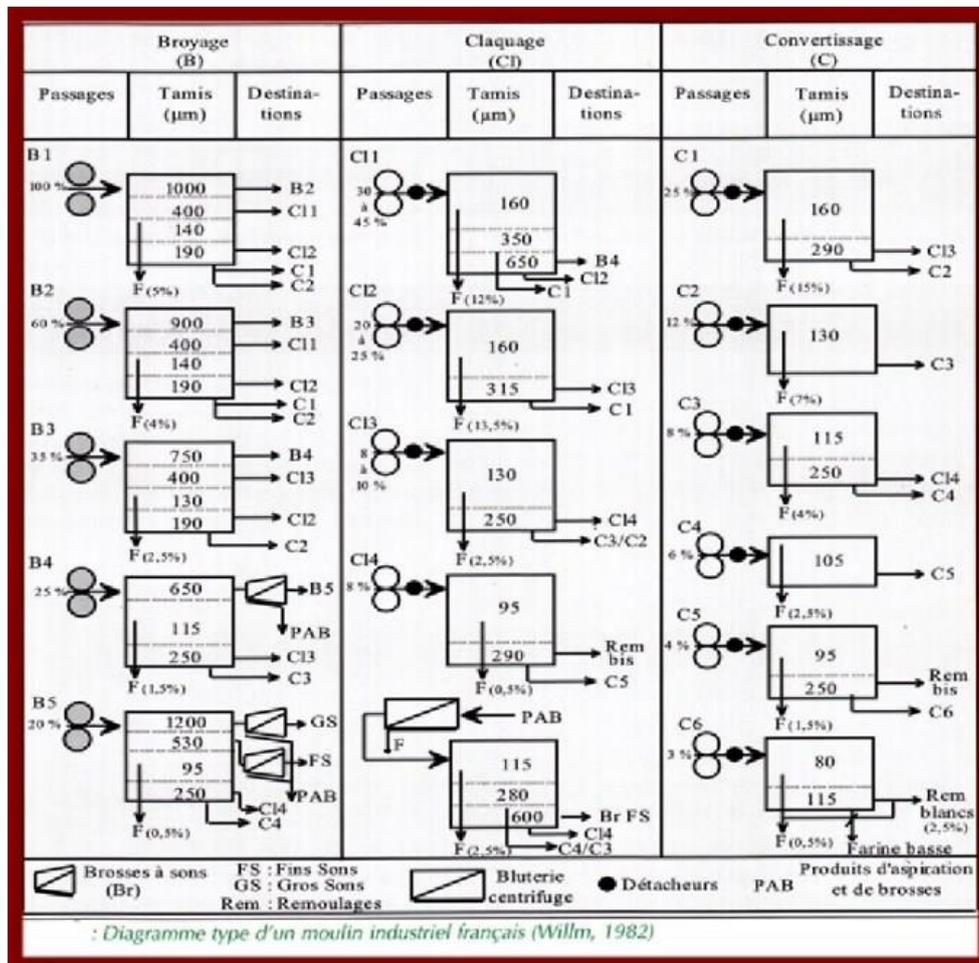


Figure I.12 : Broyage, Claquage et Convertissage
(Source les Pains Français : Hubert CHIRON, Philippe ROUSSEL)

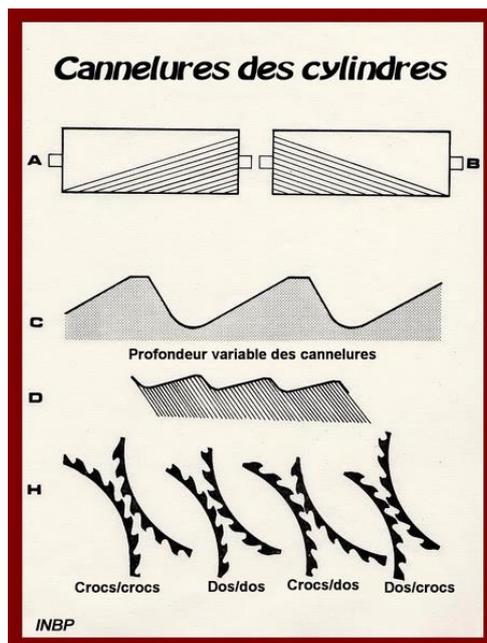


Figure I.13 : Positionnement des crocs des cylindres dans la progression de la mouture.

I-5-4-3.MOUTURE SUR MEULES DE PIERRE

Les meules de pierre sont utilisées depuis le néolithique. Elles se sont améliorées au fil des temps (des meules manèges mues par des chevaux aux meules actionnées par des forces naturelles : eau, vent...).

Le rendement de cet écrasement traditionnel est plus faible mais le grain est écrasé dans sa totalité : Ce qui conduit à l'écrasement du germe. Sous l'action des meules, une petite partie du son et du germe est réduite en particule très fine qui se mêle intimement à la farine.

Cette méthode de mouture permet d'obtenir une farine plus "forte" et plus "riche" en vitamines et minéraux, à l'odeur naturelle de froment et aux qualités incomparables.

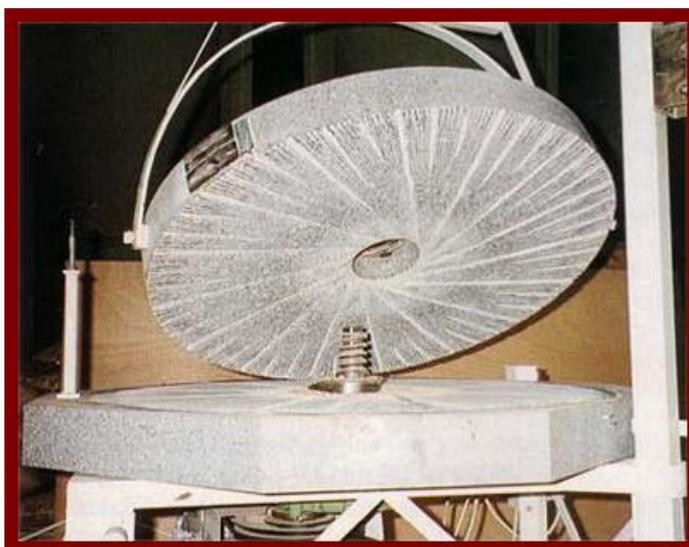


Figure I.14 : Meule de pierre

Les meules peuvent être horizontales, verticales ou de type « SODER ». La paire de meules horizontales est composée de deux parties superposées. La partie supérieure mobile est appelée « tournante » (vitesse environ 100 tours/minute). La partie inférieure fixe est appelée « gisante ». Le rapport de vitesse est donc très élevé.

Le grain arrive au centre de la meule tournante pour être écrasé progressivement et entraîné graduellement jusqu'à la périphérie où il est évacué.

La plus grande servitude qu'imposent les meules est certainement la nécessité de les entretenir régulièrement. La surface d'une meule n'est pas uniforme : Elle est parcourue par des rayons dont le profil et la disposition sont spécialement étudiés pour permettre une distribution optimale des graines et leur refroidissement. Il faut de temps en temps redonner un peu de « mordant » à ces rayons : C'est le rayonnage qui s'effectue avec un marteau particulier. Entre chacun des rayons se trouvent les « portants » qui constituent véritablement la surface travaillante de la meule ; ces portants sont eux-mêmes parcourus par de minuscules entailles linéaires nommées « rhabillures » qu'il faut raviver régulièrement.

La difficulté majeure à surmonter consiste à limiter l'échauffement lié à la pression des meules sur la mouture. Il fallait donc imaginer un système complexe de rayons participant à la ventilation de l'entre-meules et à la fois, à l'avancée progressive de la matière de l'*œillard* vers la *feuillure* située en périphérie.

Les meules à blé ont longtemps moulu cette céréale en seul passage. Il a fallu rechercher le principe optimal d'extraction des farines et de curage des sons qui doivent être non brisés et exempts de farine

I-5-4-4.MEULES DU TYPE « SODER »

Les meules du type « SODER », constituent en quelque sorte une solution intermédiaire entre les anciennes meules horizontales et les broyeur à cylindres. Elles sont en effet composées d'un cylindre horizontal à base de pierre meulière broyée et liée par un ciment spécial, ce cylindre écrase le grain contre un sabot réglable de même composition et qui s'écarte automatiquement dès qu'un objet dur se présente.

Ce genre d'appareil bénéficie de la plupart des avantages techniques des broyeur à cylindres : Entretien aisé, moins énergivore que les meules, moindre d'échauffement.

D'une manière générale dans la mouture avec meules, on assiste à un travail avec écrasement et usure qui a pour conséquences :

- De provoquer un échauffement important, qui se traduit par une perte en eau supérieure à la mouture sur cylindres.
- D'entraîner une réduction de la taille des enveloppes dont les dimensions seront voisines des autres particules (brisures d'enveloppes).
- Pour un type donné, la faine de meule est d'une granulométrie plus homogène.
- De donner une couleur de fond plus homogène et plus ocre, conséquence de l'écrasement du germe. Les farines de meules sont donc plus riches en matières grasses et donc moins aptes à la conservation [5].



Figure I. 15: Meule de types SODER

Entre les rayons, la meule est parcourue de fines stries, également taillées dans la pierre, pour rendre celle-ci plus agressive et ainsi mieux broyer les grains. Ces stries sont appelées *rhabillures*.

La paire de meules constitue le cœur du moulin. Dans cet ensemble protégé par l'archure (14), la meule dormante (8) est installée sur un support (12) qui est fixé à une poutre (13). Le *petit fer* (11) est animé d'un mouvement de rotation provenant de la roue à eau ou des ailes du moulin. Il se prolonge par la *fourchette* (10) au niveau de laquelle est fixée l'*anille* (9) appelée aussi *fer à moulin*. Cette pièce métallique, généralement en forme de X, est incrustée ou scellée dans la meule courante (7) et sa fonction principale est de transmettre le mouvement à la meule tournante (voir figure ci-dessous).

D'un point de vue historique, l'apparition de cette pièce mécanique est considérée comme une révolution technologique qui bouleversa les performances des meules et moulins [5].

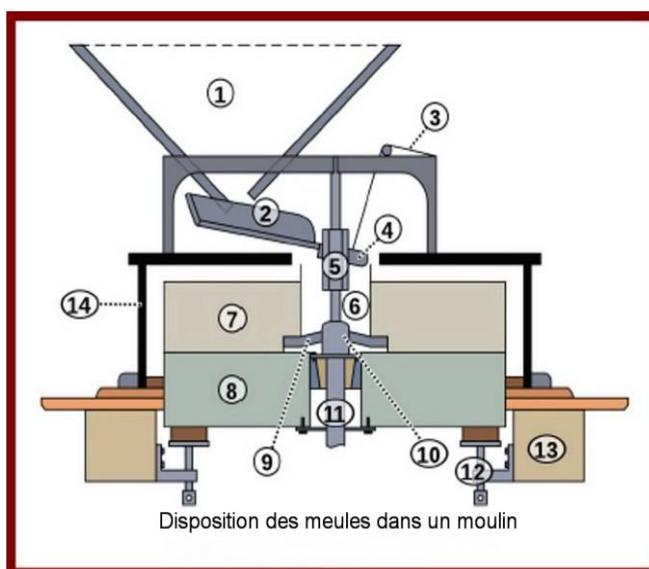


Figure I.16 : Diagramme de Disposition des meules dans un moulin

I-5-4-5. PLANCHISTERS

Le plansichter est une machine utilisée dans les minoteries. Il permet, par blutage, la séparation des différents produits de mouture : sons, finots, semoules et farines.

Le plansichter vient des deux mots allemands « plan », qui signifie : « plan », et « sichter », qui signifie « classificateur », ce qui permet de traduire par « tamisage plan », par opposition au blutoir traditionnel rotatif.

Après chaque opération de broyage, de claquage ou de convertissage, les particules obtenues sont classées en fonction de leur grosseur par le passage au travers des tamis superposés du « plansichter ».

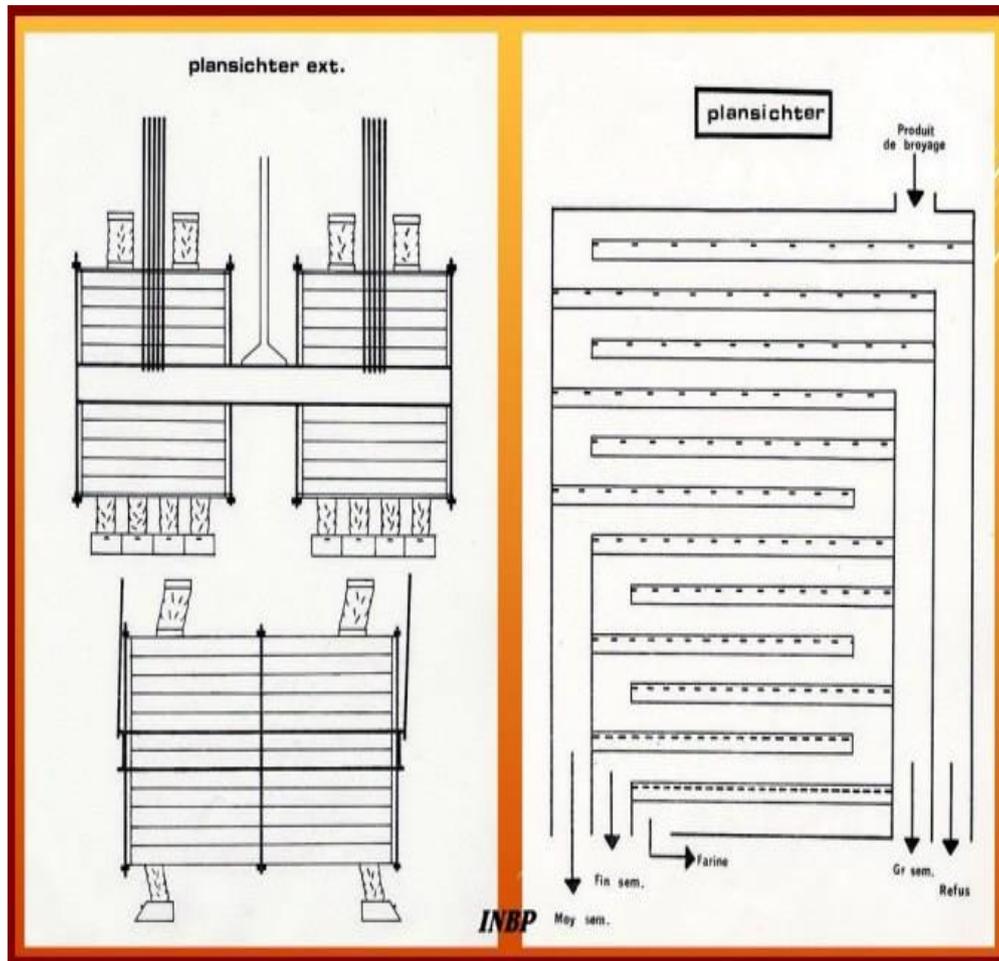


Figure I.17 : Diagramme explicatif des plansichters

Le refus est envoyé à l'appareil suivant c'est-à-dire au broyeur suivant. Les grosses et fines semoules sont dirigées vers le claquage et le convertissage. Au dernier stade les refus sont constitués par les « sons » et les remoulages.

I-6. CARACTERISTIQUES DES FARINES DE PASSAGES : (POURCENTAGES / MATIERE SECHE)

Tableau I.4 : Caractéristiques des farines de passages : (Pourcentages / matière sèche)

Farines de passages	% / farine totale	%/ MS cendres	%/ MS amidons endommagés Méthode Audidier	%/ MS Protéines	Temps de chute Hagberg (S)	W	P	G
Broyage								
B1	7%	0,40%	10,2%	9,5%	260	+	+	+++
B2	7%	0,60%	10,2%	10,2%	330	++	+	++++
B3	3%	1,20%	10,5%	13,4%	335	+++	+	+++
B4	1,5%	1,60%	10,8%	14,8%	330	++++	++	++
B5	0,5%	1,80%	12,2%	15,8%	275	++++	+++	+
Claquage								
CI1	17%	0,35%	12,6%	9,0%	340	++	+	++
CI2	13%	0,45%	12,2%	9,5%	340	++++	+	+++
CI3	3%	0,70%	15,3%	11,0%	270	++	++	++
CI4	1%	1,10%	17,0%	12,7%	245	+	++++	+
Convertissage								
C1	19%	0,45%	10,5%	10,0%	360	++++	++++	++
C2	15%	0,60%	12,1%	10,5%	345	+++++	++++	+++
C3	5%	0,80%	14,0%	11,5%	335	+++++	+++++	++
C4	3%	1,20%	14,0%	12,9%	300	+++++	+++++	++
C5	1,5%	1,40%	17,6%	13,8%	255	++++	+++++	+
C6	0,5%	1,60%	16,8%	14,7%	230	+++	+++++	+
Brosses Aspiration	3,0%							
Farine entière	100	0,57%	12,5%	10,7%	290			

Valeurs indicatives de la qualité de farines de passages d'un moulin industriel pour un blé type Médium Hard (Willm 1977). (Source les Pains Français : Hubert CHIRON, Philippe ROUSSEL)

Si le choix des blés est déterminant sur la valeur boulangère de la farine, le travail du meunier influe également de manière significative sur la qualité.

I-7. DIFFERENTS PRODUITS RENCONTRES AU COURS DE LA MOUTURE

➤ **Farine** : C'est le principal produit de la mouture constituée par des particules très fines de l'amande du grain de blé résultant de la réduction de celle-ci. Rn gros, la farine passe à travers un tamis dont l'ouverture de maille est de 0,1mm ;

➤ **Semoule** : C'est des morceaux d'amande plus ou moins vêtus d'enveloppe. Sa grosseur est très variable. La grosse semoule est retenue sur un tamis dans l'ouverture de la maille est de 0,5mm. La semoule fine est retenue sur un tamis dans l'ouverture de la maille est de 0,2 mm ;

➤ **Finots** : Sont des semoules très fines et très pures, leur taille varie autour de 0,2 mm. Ils proviennent du passage du broyage. Les gruaux sont des produits analogues aux finots. Ils proviennent de la réduction des semoules en tête du claquage et de convertissage

➤ **Issues** : Sont des produits fins autres que la farine. On distingue :

▪ **Sons** : Sont constitués par des enveloppes du grain et une certaine partie de l'amande adhérente à la face interne de ces enveloppes suivant leur taille ; on distingue des gros sons et des sons fins ;

▪ **Remoulaiges** : Ils comprennent un mélange d'enveloppes plus ou moins finement broyées et d'amande farineuse ;

▪ **Farine basse, de couleur bise, extrêmement piquée** : Elles correspondent aux farines obtenues en faible quantité à la fin du claquage et du convertissage.

I-8. INFLUENCE DU BLUTAGE SUR LES QUALITES NUTRITIONNELLES DES FARINES

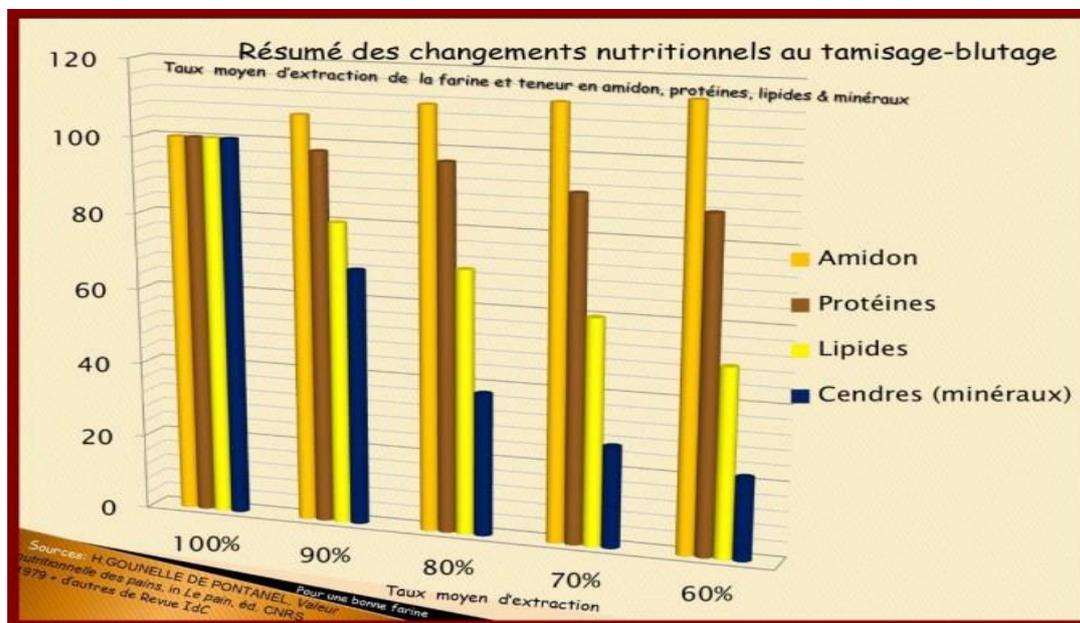


Figure I.18 : Influence du Blutage sur les qualités nutritionnelles des Farines
(Source Boulangerie.net- Marc Dewalque) /
Diagramme résumant les changements nutritionnels au tamisage-blutage

Plus le blutage augmente, plus le taux d'extraction de la farine diminue. Ceci a une incidence directe sur les qualités nutritionnelles de la farine. En effet, il modifie la teneur en amidon, protéines, lipides et matières minérales de celle-ci [5].

I-9. NOTION DE VALEUR MEUNIERE

Cette notion est associée au rendement de farine, pour un type de farine donné.

A partir de 1963, l'évolution de la réglementation française dans la définition des types de farines a contribué à l'optimisation des taux d'extraction ou rendements meuniers.

(Le taux d'extraction d'une farine représente la quantité de farine obtenue avec 100kg de blé : soit entre 75 et 80 Kg de farine pour une farine Type 55).

Avant cette date, l'extraction de la farine était effectuée en fonction du poids spécifique du Blé (*PS+1* ou *PS- 3* par exemple). Ainsi pour un blé ayant un poids spécifique de 78kg/hl, (*Poids de blé contenu dans 1 hectolitre*) le taux d'extraction était alors pour « *PS+1* » de $78+1 = 79$ % de farine et pour « *PS-3* » de $78-3 = 75$ % de farine.

Le poids spécifique était pour le meunier une bonne indication, car celui-ci augmente lorsque la proportion d'amande du grain augmente, l'amidon étant plus lourd que les enveloppes.

Depuis 1963, c'est le taux de cendres ou matières minérales qui déterminent la classification des farines [5].

Tableau I.5 : Taux d'extraction et type de farine

Type de Farine	Taux d'extraction moyens (% farine) mouture sur cylindres
T= 45	70 à 75%
T= 55	75 à 80%
T= 65	78 à 83%
T= 80	82 à 86%
T= 110	87 à 90%
T= 150	90 à 98%

Source « Les Pains Français » Hubert Chiron et Philippe Roussel

I-10. QUALITES TECHNOLOGIQUES

Le cadre réglementaire ne prend pas en compte la qualité des matières premières et des produits finis au plan technologique et organoleptique. Pour le professionnel, la classification technologique suivant les destinations des farines apparaît comme étant un indicateur suffisamment pertinent, en particulier sur la valeur technologique de la farine.

Tableau I.6 : Qualités Technologiques

Destination des farines	Force Boulangère moyenne (W) (Sans acide ascorbique)
Pain de tradition avec pointage long	150 à 180
Pain de tradition	200 à 220
Pain courant français	180 à 220
Pain en pousse contrôlée.	200 à 250
Pain français par congélation de la pâte	220 à 270
Biscottes, Pain de mie courant	200 à 240
Pain de mie type américain	>350

Source « Les Pains Français » Hubert Chiron et Philippe Roussel

I-11. QUELQUES NOTIONS SUR LA FARINE

I-11-1. DEFINITION

Le congrès de répression des fraudes en France, au cours de ses travaux en 1908 et 1909, donna de la farine de froment la définition suivante :

« La dénomination de la farine, sans autre qualificatif, désigne exclusivement le produit de la mouture de l'amande du grain du froment nettoyé et industriellement pur »

« Le produit de la mouture des autres graines : Céréales, légumineuses nettoyés et industriellement purs, désigné par le mot : farine, suivi du qualificatif indiquant l'espèce de graines, de céréales ou de légumineuses, entrant dans la composition, soit à l'état isolé ou celui du mélange »

« Doit être considéré comme pur, la farine qui renferme accidentellement :

- Une très petite quantité de farine, de graines étrangères, croissant ou pouvant croître avec le blé ;
- Une petite quantité de sable très fin provenant des fragments pierreux qui se sont échappés lors du nettoyage des graines comprises pour la plupart du temps entre 15 et 300 grammes par quintal »

I-11-2. COMPOSITION CHIMIQUE DE LA FARINE

La composition chimique de la farine se résume comme suit :

Tableau I.7 : Composition Chimique de la farine

Caractéristiques	Valeur en %
Humidité	14 à 16%
Matières Azotés	8 à 12% dont 7 à 10% du Gluten
Matières Minérales	0,45 à 0,60%
Matières Grasses	1,20 à 1,40%
Acidité	0,020 à 0,050%
Sucre	1 à 2%
Amidon	60 à 72%
Matières Cellulosiques	Traces
Diastases	Plusieurs Diastases sont présentes dont la Béta-Amylase est la plus importante
Vitamines	Du groupe B-PP-et E

I-12. CONCLUSION

Le blé est la principale ressource alimentaire de l'humanité; il assure 15% de ses besoins énergétiques. [10]

Le principal objectif de ce chapitre a été de connaître les divers procédés industriels de la transformation du blé, l'utilisation et les approches technologiques.

Le blé se prête aujourd'hui à la fabrication industrielle d'un nombre extraordinairement diversifié d'aliments comme le pain, la galette, le couscous, les pâtes alimentaires, biscuits...etc.

Cette diversité d'usage ouvre la voie au développement de l'industrie ce que résulte une pollution menace l'environnement (le salarié dans l'unité de son travail, les habitats, les biens...).

CHAPITRE II : NOTION DE POLLUTION ENGENDRÉE PAR LES POUSSIÈRES**PREMIÈRE PARTIE : NOTIONS SUR LES POUSSIÈRES****II-1. INTRODUCTION**

Que l'on vive à la campagne ou en ville, les poussières font partie de notre quotidien. Les poussières des villes font l'objet d'une attention particulière : Elles sont surveillées, leur composition, leurs sources d'émission et leurs effets sur la santé sont relativement bien connus. En revanche, les poussières en zones rurales, notamment les poussières d'origine agricole, ne suscitent pas la même inquiétude. Pourtant il est probable que leurs effets ne soient pas anodins. Des études en milieu professionnel ont déjà montré le risque induit par les poussières d'amiante, de bois, de carrières

II-2. GENERALITES ET DEFINITIONS**II-2-1. GENERALITES**

Les poussières sont de compositions, densités, formes et dimensions très diverses selon leur mode de formation. Elles sont principalement caractérisées par leur diamètre aérodynamique qui est défini comme étant celui d'une particule sphérique, de masse volumique 103 kg/m^3 dont la vitesse de chute en air calme est identique à celle de la particule concernée dans les mêmes conditions (température, pression, humidité relative).

On distingue deux types de particules, ayant des modes de formation différents :

- 1- Grosses particules d'origine naturelle qui sont principalement émises par des processus mécaniques et biologiques (2 à 100 μm) ;
- 2- Fines particules d'avantage émises par des procédés de combustions ou industriels (ultra fines : < 0,1 μm et fines : entre 0,1 et 2 μm).

Les poussières en fonction de leur nature peuvent interagir entre elles, avec d'autres substances ou la lumière.

A titre indicatif, la qualité de l'air, en ce qui concerne les poussières, peut être quantifiée et qualifiée comme suit :

- Niveau de fond : de 30 à 120 $\text{mg/m}^2/\text{jour}$
 - Empoussièrément annuel :
 - Très faible : < 150 $\text{mg/m}^2/\text{jour}$ (zone faiblement polluée) ;
 - Faible : de 150 à 350 $\text{mg/m}^2/\text{jour}$ (zone moyennement polluée) ;
 - Important : de 350 à 500 $\text{mg/m}^2/\text{jour}$ (zone polluée) ;
 - Fort : de 500 à 1 000 $\text{mg/m}^2/\text{jour}$ (zone très polluée) ;
 - Très fort : > 1 000 $\text{mg/m}^2/\text{jour}$ (zone très fortement polluée).
- (Les retombées se mesurent en mg/m^2 et par jour.)

Les empoussièrtements supérieurs à 1 000 mg/m²/jour, peuvent être considérés comme exceptionnels, ces taux se ressentant essentiellement dans les zones particulièrement empoussiérées et généralement lors des mois secs et ventés.

Par ailleurs, le seuil de 500 mg/m²/j peut être considéré comme le seuil d'une gêne pouvant être quantifiée d'importance, la norme allemande fixant à 350 mg/m²/jour, le seuil d'apparition d'une gêne potentielle.

- Urbaine et polluée : 0,08 mg/m³ (urbanisation ou industrialisation dense) ;
- Concentration dans l'air (cf. AM du 02.02.1998) :
- Zone non polluée : 0,01 mg/m³ (rase campagne) ;
- Zone peu polluée : 0,04 mg/m³ (urbanisation ou industrialisation moyenne) ;
- Zone diminution de visibilité.

La diminution de visibilité est due aux particules très fines (hors phénomène météorologique) et la réduction de visibilité peut être appréciée en fonction des seuils suivants :

- 1 mg/m³ réduit la visibilité à 500 m ;
- 200 mg/m³ réduisant la visibilité à 150 m ;
- 100 000 mg/m³: aucune visibilité.

D'autre part, il est rappelé les différentes valeurs générales maximales de la qualité de l'air, en France, telles que précisées à l'article R. 221-1 du code de l'environnement.

En particulier les céréales constituent un exemple de poussières agro-alimentaires. Ces poussières sont composées par exemple de 65,3 % d'amidon, 6,8 % de fibres (cellulose), 4 % de lipides et 6,5 % de protéine, 9 % d'humidité et 8 % de cendres. Les variations du taux d'humidité et du taux de cendres peuvent être très importantes. Même si l'amidon, les lipides, les protéines et les fibres ont des compositions chimiques différentes et conduisent à des produits de combustion différents, on peut cependant écrire une formule chimique pour les poussières sèches et humides :

- Pour les poussières humides : C 3,23 H 6,38 O 2,87 N 0,06 + cendres.
- Pour les poussières sèches : C 3,57 H 5,89 O 2,59 N 0,07 + cendres

II-2-2. DEFINITIONS

Les poussières se définissent comme suit :

"Toute particule solide dont le diamètre aérodynamique est au plus égal à 100 micromètres ou dont la vitesse limite de chute, dans les conditions normales de température, est au plus égale à 0,25 mètre par seconde. Les poussières ainsi définies sont appelées "poussières totales". Toute poussière susceptible d'atteindre les alvéoles pulmonaires est considérée comme "poussière alvéolaire". Le "diamètre aérodynamique" d'une poussière est le diamètre d'une sphère de densité égale à l'unité ayant la même vitesse de chute dans les mêmes conditions de température et d'humidité relative [11].

II-3. DIFFERENTS TYPES ET ORIGINES DES POUSSIÈRES

II-3-1. ORIGINES DES POUSSIÈRES

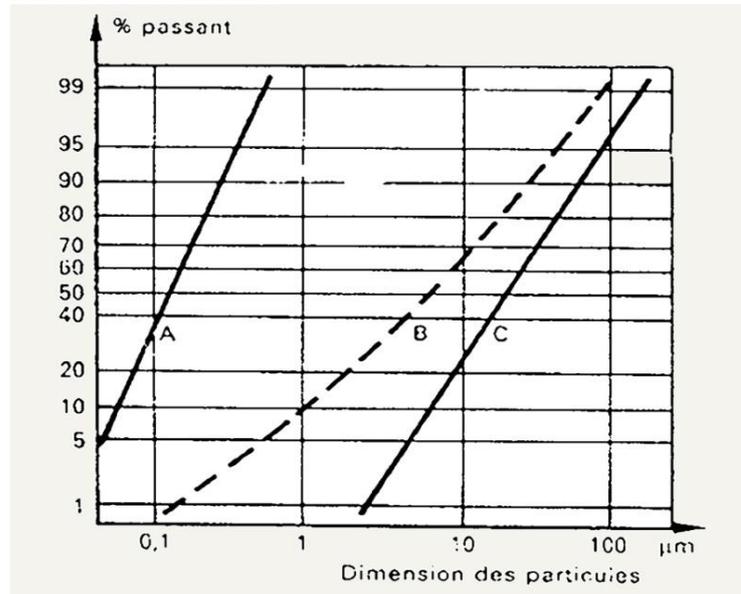


Figure II. 1 : Représentation granulométrique

II-3-1-1. ORIGINE NATURELLE

1- **Minérale** : Par exemple les particules détachées et mise en suspension dans l'air par l'action de vent (érosion). La tempête de sable en est un cas extrême.

2- **Végétale** : par exemple les pollens, bactéries, virus.

3- **Animale** (déjections des poules, pigeons, perruches...) : Sont sources d'expositions très nombreuses et variées en milieu professionnel.

Peuvent provenir directement des matières premières utilisées (sous forme de poudres notamment) et sont alors libérées lors de leur production, leur transport, leur stockage ou leur mise en œuvre (extraction, concassage de minerais, fabrication de farine, fabrication et utilisation de matières plastiques...).

Sont aussi produites lors de la transformation de produits manufacturés finis ou semi-finis (usinage de métaux, sciage, ponçage, meulage de bois ou matériaux synthétiques, broyage de déchets...) ou lors d'opération de démolition ou de nettoyage.

II-3-1-2. ORIGINE MECANIQUE

Elles sont obtenues par condensation d'une vapeur à l'état liquide puis solide. Elles se transforment à la température ambiante lors de réaction gaz-gaz ou par condensation lors de l'élaboration de matériaux à haute température (exemple : fabrication de l'acier, la vapeur de fer au dessus du bain condense par refroidissement puis s'oxyde pour donner des fumées rouges)

Les poussières d'origine thermique, issues de combustion ou de procédés thermiques.

Elles comprennent, d'une part, les imbrûlés carbonés, qui résultent le plus souvent d'une combustion incomplète, et, d'autre part, les cendres minérales, qui constituent un résidu fatal de combustion ou proviennent de matières premières n'ayant pas réagi. En général, ces poussières sont majoritairement constituées de fractions fines importantes.

Ces poussières "submicroniques" sont toutes de dimension inférieure au micron lors de leur formation, et d'autant plus petites que le phénomène de condensation est brutal. On ne les observe qu'au microscope électronique. Ces poussières s'agglomèrent entre elles, sitôt après leur formation, sous l'effet de phénomènes divers tels :

1- L'agitation due au mouvement BROWNIEN (sous l'effet de la température, les molécules gazeuse heurtent les particules et provoquent chez les plus fines d'entre elles des mouvements désordonnés qui favorisent leur rencontre, et cela d'autant plus que leur concentration est importante et la température plus élevée ;

2- Les charges électriques qui prennent naturellement naissance lors des changements d'état, ou qui peuvent être introduites volontairement. Les particules chargées de signes contraires s'attirent l'une vers l'autre tandis qu'au contraire des nuages de particules de même signe peuvent résister à l'agglomération ;

3- A très faible distance enfin, les particules sont attirées par les forces de Van der Waals. Ces forces ont surtout pour effet de maintenir agglomérées entre elles les particules qui sont entrées en contact sous l'un des effets précédents.

Une fois agglomérées, les particules d'origine chimique ou thermique peuvent constituer des amas de particules dont les dimensions atteignent celles des particules d'origine mécanique. Souvent enfin, les deux types de population sont présents dans une même fumée. (Ainsi par exemple, dans les fumées provenant d'un four électrique, on trouvera en même temps des poussières dues à l'entraînement mécanique de la charge et des fumées rousses submicroniques obtenues par condensation de la vapeur de fer).

Les particules liquides sont également de dimensions très différentes selon qu'elles sont d'origine mécanique (pulvérisation) ou thermique (condensation de brouillards). Ainsi, les gouttes obtenues par pulvérisation dans des laveurs de gaz sont pour la plupart comprises entre 20 et 1000 μm , tandis que les brouillards acides obtenus par condensation de vapeurs sont très généralement de dimension inférieure à 0,1 μm .

On conçoit donc que les procédés à mettre en œuvre pour capter ces deux familles de particules, qu'elles soient solides ou liquides, seront le plus souvent différents. Il est donc essentiel de pouvoir correctement les identifier.

Dans l'entreprise de transformation des céréales, nous avons deux sortes de poussières :

▪ Les poussières minérales provenant du grain de blé et les poussières organiques provenant de la farine elle-même ;

*/ Dans les locaux d'entreposage et de nettoyage, les poussières minérales peuvent contenir jusqu'à 50% de particules d'origines minérales. (Voir la composition chimique des poussières de grain) ;

*/ Dans les ateliers de mouture, les poussières organiques peuvent contenir jusqu'à 95% de la matière d'origine organique. (Voir la composition chimique de la farine).

Tous les processus technologiques et les opérations de transport des grains dans les entreprises de transformation ou d'entreposage des céréales dégagent beaucoup de poussières ce qui implique qu'il y a pollution de l'atmosphère.

On ne peut faire circuler les grains sans produire de la poussière.

Le moindre transport frotte les grains les uns contre les autres, et leurs enveloppes abrasives détachent la poussière collée à leur surface (résultat des précédents contacts) et en même temps les mouvements des grains engendrent, par usure, une nouvelle poussière, les quantités de poussières produites sont plus importantes lorsque les lots de grains sont "sales" (lorsqu'il y a des grains attaqués par les insectes, les acariens et les brisures).

II-3-2. LES TYPES DE POUSSIÈRES

La poussière est générée par une variété de processus à la fois naturels et industriels. Par exemple, le vent et les intempéries entraînent l'érosion des solides, ce qui crée de la poussière. Les processus mécaniques et de fabrication de même que les réactions chimiques peuvent tous créer de la poussière qui peut ensuite facilement se répandre dans le lieu de travail par des activités quotidiennes.

❖ Classification des poussières en général

1- **Poussières inertes, gênantes, désagréables** : Celles-ci n'ont pas d'effet toxique spécifique mais peuvent procurer une sensation très désagréable. C'est le cas notamment pour la majorité des fibres du bois, la cellulose, le gypse.

Le taux d'empoussièrement ou valeur VLE (Valeur Limite d'Exposition) est :

- Poussières totales : 10 mg/m³ ;
- Poussières alvéolaires ou inhalables : 1 mg/m³ pour 1997 (fractions alvéolaires : 0,3 à 5 µm) ;
- Poussières toxiques : Celles-ci ont un effet toxique spécifique sur une partie ou sur l'ensemble du corps humain, en fonction de leur composition chimique. Par ex. : influence des poussières de plomb sur le système osseux.

2- **Poussières provoquant des allergies** : Certaines poussières (d'origine animale ou végétale) peuvent être cause d'asthme, d'eczéma. Leur effet diffère d'un individu à l'autre. Aucune valeur VLE n'est établie pour ces dernières.

- Poussières fibrinogènes

Celles-ci sont le plus souvent source de maladies bien spécifiques comme la silicose (silice), l'asbestose (du mot asbeste ou amiante), la tungstose (tungstène), la sidérose (acier ou graphite) etc...

❖ *Classification des poussières selon leur grandeur de particules*

Il existe quatre classes principales de filtration:

- 1- Les poussières grossières (G) ont des particules d'un diamètre $> 10 \mu\text{m}$ (particules restent dans les narines),
- 2- Les poussières medium (M) ont des particules d'un diamètre entre 3 et $10 \mu\text{m}$,
- 3- Les poussières fines (F) ont des particules d'un diamètre entre 1 et $3 \mu\text{m}$ (pénètrent profondément dans les poumons)
- 4- Les poussières extra-fines (E-H-U), pour les filtres absolus, ont des particules d'un diamètre $< 1 \mu\text{m}$ (germes, bactéries, virus, etc.) [12].

La grandeur des particules est définie en micromètre (μm). A noter encore que l'œil humain peut voir plus ou moins des particules de $50 \mu\text{m}$. Très souvent, la finesse d'un filtre est en corrélation avec la perte de charge. Plus nous filtrons fin, plus la perte de charge initiale du filtre est élevée. C'est une des raisons pour laquelle les filtres absolus ont un médium sous la forme plissée, pour augmenter la surface interne de filtration. Avec nos différents filtres, vous êtes sûr de diminuer les effets néfastes liés à l'inhalation de substances problématiques.

Les différents types de poussières qu'on peut rencontrer entre autres :

1- Poussière de béton : Le travail avec du béton génère de très fines particules de poussière de silice dans l'air. L'inhalation de trop de poussière de ce type présente de sérieux risques pour la santé et peut entraîner à terme une silicose. Cette maladie, caractérisée par un épaississement ou des lésions des poumons peut être à l'origine d'un cancer des poumons.

2- Sciure de bois : En général, on parle tout simplement de «sciure». A chaque fois que du bois est poncé, affûté, percé ou coupé, de fines particules de poussière pénètrent dans l'air et forment une couche épaisse en se déposant. Inspirer cette poussière peut être très nocif pour la santé; l'inhalation excessive de sciure provoque des allergies et des cancers bien qu'il faille encore déterminer la portée des risques réels.

3-Poussière de craie : La craie utilisée laisse des traces de poussière dans l'air et sur les surfaces. Cette poussière n'est pas toxique, mais si elle est accumulée dans le système respiratoire, elle peut générer des problèmes de respiration ou des douleurs thoraciques.

4-Poussière de caoutchouc : Les pneus en caoutchouc sont le principal responsable de la poussière de caoutchouc. Une simple marque de freinage sur la route ou des conditions de conduite difficiles use le caoutchouc et fait tomber des fragments de caoutchouc. La même remarque s'applique également aux véhicules à l'intérieur des lieux de travail comme les chariots élévateurs. Lorsqu'ils font leurs tournées, ils diffusent de la poussière de caoutchouc et soulèvent également d'autres types de poussière qui ont pu se déposer sur le sol. L'usure normale est également un problème : lorsque les pneus se compriment et se dilatent dans le cadre de leur utilisation régulière, des copeaux de caoutchouc se dispersent et forment de la poussière. La poussière de caoutchouc contient des produits chimiques extrêmement toxiques dont il est prouvé qu'ils sont néfastes pour l'ADN humain. Le latex par exemple est un composant de poussière de caoutchouc souvent lié à des allergies et à l'asthme.

5- Poussière de plastique et de fibre de verre : La fibre de verre est essentiellement de la laine de verre. Elle est composée de filaments fins de verre et de fil qui sont ensuite tissés en un tissu. Il n'y a pas encore assez de preuves pour l'associer directement à des maladies

respiratoires, mais beaucoup pensent que l'inhalation excessive de fibre de verre ou de particules de poussière plastique génère ou peut générer des problèmes de respiration.

6-Poussière métallique : Le processus de perçage ou de ponçage des métaux génère de la poussière dans l'air, ce qui est nocif pour les êtres humains. Les ouvriers exposés régulièrement à cette poussière peuvent souffrir d'irritation des poumons et de la gorge. Néanmoins, il y a certains types de poussière métallique qui sont plus nocifs que d'autres. Le métal qui est notamment constitué de cobalt, de plomb ou de nickel est extrêmement toxique et les ouvriers y étant exposés ont besoin de porter un appareil respiratoire pour éviter des lésions pulmonaires permanentes.

7-Poussière des industries agroalimentaires : L'industrie agroalimentaire travaille avec des matières friables (farine, sucre, riz, céréales...) avec caractéristiques explosives spécifiques.

Pendant la fabrication industrielle, de petites particules provenant de la matière friable se libèrent dans l'air. Le mouvement de l'air provoque leur tourbillonnement, ainsi, c'est particules atteignent facilement une concentration explosive. Un contact de la poussière soulevée avec une source d'initiation effective engendre une explosion dangereuse. [13]

II-4. PROPRIETES PHYSIQUES DE LA POUSSIERE

Plusieurs paramètres sont à prendre en compte:

➤ *Concentration*

Partout dans le monde nous trouvons des poussières en suspension dans l'air. A titre indicatif, nous reprenons ci-après quelques concentrations courantes et connues de poussières dans différents environnements type :

- Grande ville par temps sec : 0,2 - 0,25 mg/m³ ;
- Grande ville après la pluie : 0,05 - 0,1 mg/m³ ;
- Campagne : 0,003 - 0,04 mg/m³ ;
- Salle de séjour : 0,08 - 0,1 mg/m³ ;
- Chambre à coucher : 0,01 - 0,02 mg/m³.

Dans le cadre d'une installation d'aspiration traditionnelle, l'installateur prendra en compte une concentration de 30 g/m³ pour l'industrie du bois. Cette donnée pourra être de 5 g/m³ voire 1 g/m³ dans une industrie hors bois où la matière première poussiéreuse a une valeur marchande. Mais lors de l'utilisation des machines modernes travaillant en continu à des vitesses d'avance de 160 m/min, il faut prendre soin de calculer la quantité de déchets à capter : dans ce cas, les réseaux sont assimilés à du transport pneumatique où les concentrations peuvent atteindre 330 g/m³.

➤ *Explosivité*

Quelles que soient les poussières, il est nécessaire de déterminer le risque et si, il est existant il faut en connaître la classe d'explosivité correspondante.

Des matières aussi inoffensives que l'aluminium, le sucre, la farine peuvent, sous forme de poussière, et sous certaines concentrations, se transformer en explosifs redoutables. De façon générale il y a lieu de se méfier de toutes substances inflammables (poudres d'origine végétales par exemple) ou non suffisamment oxydées (aluminium ou zinc par exemple).

La poussière du bois est, elle aussi, explosive. Le plus important est la concentration des particules de poussières dans le nuage. On estime qu'une explosion peut se déclarer pour de la cellulose sèche à une concentration de 45 mg/m³. (En général l'explosion de poussière ne se produit pas avec des matériaux à un niveau d'humidité supérieur à 15% et dans une ambiance turbulente).

➤ Toxicité

Les poussières provoquent différents type de nuisances : salissures et détérioration du matériel lors de leur dépôt, toxicité selon leur nature et leur dimension. Ce sont les particules les plus fines, de dimension comprise entre 0,3 et 5 µm qui sont généralement les plus dangereuses pour l'homme, car inhalables par les voies respiratoires. Elles peuvent par les poumons et la circulation sanguine pénétrer les autres organes.

Les principaux facteurs à prendre en considération sont:

- La dimension des poussières (fraction inhalable);
- La nature ou la composition chimique des poussières;
- La quantité de poussière en suspension dans l'air (concentration);
- Le temps d'exposition;
- La température ambiante, les contraintes de travail;
- L'apparition tardive des premiers symptômes de maladie.

Les différents critères sont intimement liés, examinons les plus en détail :

Les particules < à 5 microns sont, comme on vient de le voir, les plus dangereuses. Même si les matières qui la composent ne sont pas toxiques.

Les particules < à 0,3 micron sont inhalées mais on considère qu'elles sont rejetées lors de l'expiration.

Les particules > à 5 microns sont généralement arrêtées au niveau des voies respiratoires. Elles sont expulsées par les voies naturelles. Elles ne sont pas considérées comme dangereuses (mais peuvent être gênantes) à condition qu'elles ne soient pas toxiques.

L'amiante constitue, toutefois, un cas particulier. On trouve des fibres pouvant atteindre 100 µm dans les poumons et dans tout l'organisme.

➤ Abrasivité

Ne pas tenir compte de ce paramètre serait source de grande surprise. Certaines poussières du bois sont très abrasives (comme par exemple les sciures d'une scierie ou les déchets d'un

broyeur), et la prudence impose de diminuer la vitesse de l'air dans les canalisations afin d'éviter l'usure. Le choix du séparateur devra tenir compte de cette donnée.

➤ *Hygrométrie*

L'humidité de l'air ou de la poussière aura une très grande importance sur le choix du dépoussiéreur, certaines particules sont avides d'eau, aussi le calcul des réseaux ainsi que le choix du média filtrant devront être appropriés à cette donnée.

➤ *Densité*

La troisième caractéristique à prendre en considération est la densité apparente, ou la masse d'un m³ de poussières. Cette densité apparente est inférieure à la densité réelle de la matière usinée. En règle générale la densité apparente, des poussières de bois, est de l'ordre de 0,3. Il faudra faire très attention à quelques exceptions : densité du Pin 0,065.

➤ *Granulométrie*

C'est-à-dire la courbe de répartition de la taille des particules solides contenues dans les gaz aspirés. Les dimensions peuvent varier de plusieurs millimètres, à moins du micromètre (μm).

Il faut distinguer:

La granulométrie vraie des poussières qui est celle des particules solides, produites par usinage, broyage ou abrasion.

La granulométrie apparente de ces mêmes poussières, qui ont tendance, spécialement pour le bois, à former des agglomérats de dimensions plus importantes que celles des particules élémentaires.

Il faut les examiner et les connaître quelque soit l'industrie en cause.

Tableau II.1 : Vitesse de chute en fonction de la dimension des particules [11]
(Source : Campanac et al., 1990)

Dimension des particules en microns (diamètre aérodynamique)	Vitesse de chute en cm/seconde
1 000	400
100	30
10	0,3
1	0,0035 (12,6 cm/h)
0,1	0,000035

Autres propriétés physiques de la poussière sont:

1- Taille moyenne des particules : La poussière est visible à l'œil nu, mais une grande quantité est invisible, ou presque : Les particules fines. L'air dans lequel on travaille contient de la poussière, composée de particules. Ces particules ont des tailles différentes. Par particules fines, on désigne les particules dont le diamètre maximal est de 10 μm , également appelé PM10. PM est l'abréviation de Particulate Matter et le nombre symbolise la taille maximale des particules de poussière, soit 10 micromètres (un millième de millimètre) dans ce cas. On est confronté à la poussière dans chaque espace industriel ou de production, qu'il s'agisse de particules fines, de poussière de bois, de poussière sèche ou de poussière composée de squames, de bactéries et de moisissures. En grandes lignes, cette pollution peut être répartie en trois tailles différentes : Moins de 0,1 micromètre, inférieure à PM2,5 et inférieure à PM10.

La taille moyenne des particules se situe entre 15 et 120 μm appréciée par le tamisage c'est-à-dire comparable au diamètre moyen des particules de farine, il existe évidemment de grosses poussières pouvant atteindre et dépasser 400 μm (elles sont peu dommageables pour la santé, mais ne présentent pas de risque d'explosion primaire) et de fines particules de l'ordre du micro et moins (plus nocives que graves et peuvent pénétrer jusqu'aux poumons par inhalation) selon les dimensions des particules de poussières nous pouvons trouver en quantité plus importante :

- A- les grosses poussières (50 à 250 μm) dans les silos à grains ;
- B- les moyennes poussières (de 10 à 50 μm) dans les ateliers de nettoyage ;
- C- les fines poussières (inférieure à 10 μm) dans l'atelier de mouture.

2-Répartition granulométrique : La distribution/répartition granulométrique qui représente la fréquence statistique des différentes tailles des particules.

3- Forme : Les particules de poussières de présentent sous la forme ronde.

4- Structure des particules : La structure est cristalline aux contours anguleux et coupants ;

5-Fibreuse Colloïdale : Relatif à un colloïde, qualifie une solution liquide dans laquelle sont dispersés des granules de taille inférieure à 0,2 micron [14]

6-Faculté de s'agglomérer : C'est la capacité pour que les particules peuvent se réunir, être groupé étroitement [15].

7- Caractère hygroscopique : Une substance hygroscopique est une substance qui a tendance à retenir l'humidité de l'air, par absorption ou par adsorption.

En ce qui concerne la stabilité du nuage, on sait que les poussières grossières et de densité élevée sédimenteront rapidement; elles ont donc peu de chances de rester longtemps en suspension. Pour des poussières sphériques, de densité 1, la vitesse limite de chute dans l'air peut être calculée à l'aide de la loi de Stokes. (Tableau II .1)

8-Couleur des poussières : Les poussières minérales ont une couleur sombre genre "jaune sale " due à la présence de matières minérales et de sable. Inhalées provoquent des particules au niveau du pharynx. Leur atteinte aux yeux donne des brûlures assez méchantes.

Les poussières organiques ou poussière de farine ont une couleur blanche.

9- Vitesse de capture des poussières : Elle est à l'ordre de 0.4 m/s mais les grosses poussières de battage des sacs peuvent nécessiter des vitesses d'air trois fois plus fortes, et les très grosses nécessiteront des vitesses de l'ordre de 3 m/s.

10-Temps de dépôt : Est lié à leur concentration, et dépend de la finesse des particules.

En 15 heures et avec une concentration de 0.1g/ m³, il peut s'accumuler sur le plancher une couche de poussière qui, une fois dispersée serait capable de donner une concentration pouvant être dangereuse (supérieure à 40g/m³).

II-5. CARACTERISTIQUES DES POUSSIÈRES DE GRAIN DE BLE

ARVALIS et l'ANMF ont déterminé les caractéristiques de 41 échantillons de poussières de diverses céréales. Ces caractéristiques sont résumées dans le tableau ci-dessous :

Tableau II .2 : Caractéristiques des poussières de céréales

	Moyenne	Valeurs extrêmes
Teneur en eau (% mh)	8,9	3,6 – 13,0
Teneur en protéines (% ms)	12	5,2 – 40
Cellulose (% ms)	13,4	2,3 – 30,7
Amidon (% ms)	26,3	0,2 – 81,0
Cendres (% ms)	19,7	2,2 – 71,2

II-5-1. DETERMINATION DE LA TENEUR EN EAU

Si l'on ne tient pas compte de l'eau fixée par liaisons covalentes aux autres molécules présentes dans le milieu, on peut définir la teneur en eau d'un blé ou d'une farine comme étant la quantité d'eau éliminée après maintien du produit dans une atmosphère où la pression de vapeur d'eau est égale à zéro pendant un temps suffisant pour atteindre un équilibre en poids. Une de deux méthodes de référence utilisée pour réaliser cette mesure repose sur ce principe. Elle est très longue (six jours et plus) et difficile à mettre en œuvre; sa reproductibilité est excellente mais à la condition de s'assurer de l'absence de substances volatiles dans les conditions de l'essai (Pierre, 2000). Des méthodes pratiques d'analyse ont donc été développées. Elles se classent en trois catégories: mesure de perte de poids après séchage, spectroscopie dans l'infrarouge et mesure de constantes physiques (conductivité et constante diélectrique) (Pierre, 2000).

II-5-2. DETERMINATION DE LA TENEUR EN CENDRE

Le taux de cendres des farines dépend non seulement de leur taux d'extraction, mais également de la minéralisation des grains mis en mouture les conditions de croissance de la plante peuvent avoir pour conséquence une évolution de la teneur en matières minérales des grains qui se répercute sur celle des farines. Il est souhaitable, dans la mesure du possible, qu'il soit tenu compte de cette éventualité lors des contrôles de la teneur en cendres des farines (Chehat, 1994).

II-5-3. DETERMINATION DE LA TENEUR EN PROTEINE

Trois méthodes sont utilisées pour déterminer la teneur en protéines du blé et des farines: la méthode Kjeldahl, la méthode Dumas et la spectroscopie dans le proche infrarouge (Pierre, 2000).

On sait que la panification devient impossible lorsque la teneur des farines en protéines est inférieure à 7%. La quantité de protéines exerce donc un rôle important vis-à-vis de la qualité boulangère, ce rôle pouvant d'ailleurs être plus ou moins marqué, selon le plan quantitatif, on lui préfère le dosage des protéines, et sur le plan qualitatif, les essais rhéologiques sur pâtes (Pierre, 2000).

Quoiqu'il en soit, le rôle exercé par la teneur en protéines des farines sur leur qualité technologique est essentiellement fonction de la nature du produit fini. D'une façon générale, les fabrications nécessitant des pâtes à levée lente, fermentées biologiquement (pains et biscottes), réclament des farines à teneur en protéines toujours (Pierre, 2000). Plus élevée que celles dont la levée rapide est provoquée par des adjuvants chimiques (articles de biscuiterie et de pâtisserie) (Pierre, 2000).

➤ *Extraction des protéines et préparation des échantillons :*

La protéomique exige l'utilisation d'échantillons biologiques de qualité. L'extraction de protéines à partir de tissus, de cellules isolées ou de liquides physiologiques est réalisée à l'aide de tampons appropriés, mis au point en considérant la nature des protéines à étudier (protéines cytosoliques, membranaires, nucléaires...) (Chehat, 1994).

Les tampons d'extraction à pH bien déterminé, sont constitués dans des proportions variables, de mélanges d'agents réducteurs, de détergents, voire de solvants organiques. Ils sont généralement supplémentés d'inhibiteurs de protéases. Les protocoles expérimentaux doivent éviter les contaminations par des acides nucléiques, des lipides et les sels (Chehat, 1994).

Ces contaminants peuvent perturber la séparation des protéines par électrophorèse bidimensionnelle ou par chromatographie liquide. Les protéines hydrophobes telles que les protéines membranaires sont difficiles à solubiliser. De même, les protéines très basiques, telles que les histones et les protéines ribosomales, sont peu visibles sur un gel 2D après une iso-électrofocalisation (Chehat, 1994).

De façon générale, la protéomique fait appel à l'utilisation de l'électrophorèse bidimensionnelle (2D) hautement résolutive et la spectrométrie de masse qui associée à l'analyse informatisée des gels, permet de visualiser et de mesurer des variations de quantité

de protéines entre différents échantillons. Les protéines identifiées par spectrométrie de masse sont comparées aux protéines des banques de données disponibles sur internet (Chehat, 1994).

Intérêt nutritionnel : Les protéines sont les molécules de grande taille qui caractérisent les êtres vivants et qui sont présentes dans toutes les cellules. D'un point de vue nutritionnel, les protéines, parfois appelées protides, sont avec les glucides et les lipides, un des trois nutriments essentiels à notre alimentation. Elles sont sources d'acides aminés.

Les protéines assurent de nombreuses fonctions dans notre corps:

- Elles jouent un rôle structural et participent au renouvellement des tissus musculaires, des cheveux, des ongles, des poils, de la peau, etc.
- Elles assurent de nombreuses fonctions physiologiques, par exemple sous la forme d'enzymes, d'hormones...

Intérêt technologique : Les protéines sont classées selon leur degré de solubilité dans l'eau. De 10 à 20 % des protéines du blé sont solubles dans l'eau. Ce sont des protéines cytoplasmiques ou métaboliques. On trouve également des enzymes. Elles sont situées en périphérie du grain de blé (Chehat, 1994).

Les 80 à 90 % restantes sont insolubles dans l'eau et sont capables de s'associer pour former un réseau, une charpente, que l'on appelle le gluten. Il existe pour le blé deux familles de protéines insolubles: les gliadines et les gluténines. Les premières sont responsables de l'extensibilité et du collant des pâtes. Les secondes sont responsables de la ténacité et de l'élasticité des pâtes. Selon le rapport gliadines sur gluténines, les caractéristiques des pâtes seront donc différentes (Chehat, 1994).

II-5-4. DETERMINATION DE LA TENEUR EN AMIDON

La détermination de la teneur en amidon du blé ou des produits de mouture repose sur le dosage du glucose libéré après hydrolyse enzymatique. La méthode décrite dans la norme NF03606 préconise la dispersion de l'amidon dans une solution NAOH 0.5 M après extraction des glucides solubles dans l'éthanol 80 GL, un ajustement du PH à 4.7 par acide acétique, l'hydrolyse à 60 par l'amyloglucosidase de l'amidon ainsi dispersé et le dosage du glucose libre (dosage enzymatique par la glucose oxydase) le facteur de conversion du glucose en amidon est 0.9. Une autre méthode préconise l'hydrolyse de l'amidon par une amylase avant l'attaque par l'amyloglucosidase (Chehat, 1994).

II-5-5. DETERMINATION DE LA TENEUR EN GLUTEN

La teneur en gluten est généralement déterminée après extraction par lixiviation (lavage par l'eau) d'un pâton sous un mince filet d'eau désionisée ou salée (Pierre, 2000). Des appareils permettant une extraction mécanique et automatique du gluten sont également utilisés. Le plus courant d'entre eux est le glutomatic 22200 (perte n instruments, Huddinge, Suède).

Les conditions d'utilisation sont les suivantes: 10g de farine sont placés dans un pétrin, puis mélangés avec 5,2 ml d'une solution à 2 % de Na Cl; après 20 sec de pétrissage, la pâte est automatiquement lavée pendant 5 min avec la solution à 2% de Na Cl (débit de lavage: 50- 60 ml /min); le gluten isolé est essoré dans une centrifugeuse (6000 tr/min pendant 1 min),

pesé (gluten humide) et séché entre deux plaques chauffantes pendant 4 min (gluten sec) (Pierre, 2000).

Des techniques immuno-chimiques (immuno-électrophorèse) et, plus récemment immun enzymatique (plus sensible et plus rapide que les précédentes), commencent à être utilisées pour doser de manière spécifique les protéines du gluten (Pierre, 2000).

• **Le poids spécifique :**

Le poids spécifique dépend de leur origine :

- 200-300 kg / m³ pour le blé
- 250-300 kg /m³ pour le soja
- 100-300kg/m³ pour le sorgho

Les poussières ne sont généralement pas tassées et leur poids par m³ peut varier pour le maïs de 150kg (pour de fines particules non tassées) à 350kg (pour les mélanges hétérogènes comme taille de particules).

• **La chaleur combustible :**

4.10³ à 3.10³ cal /g environ (soit près de 17kJ /g) est fonction du pourcentage (%) de matières organiques combustibles.

La poudre de soja présente souvent une faible chaleur 2425cal/g.

Les poussières de riz humide (9 à 12 %) très minéralisées (54%) ont une faible chaleur de combustion (1930 à 2450cal/g).

II-6. COMPOSITION CHIMIQUE DES POUSSIÈRES

Plusieurs analyses sont proposées afin de déterminer la composition chimique des poussières filtrer :

- Les analyses par fluorescence X sur microscope électronique à balayage (MEB) permettent de déterminer la composition élémentaire de la poussière à filtrer ;
- La quantification de l'azote par la méthode Kjeldahl caractérise les sels d'ammonium et les dérivés nitrés ;
- La spectrométrie infrarouge détermine la composition des molécules organiques et nous oriente sur l'origine des dégradations observées sur un media filtrant.

Les résultats des analyse montre que :

Dans 87,64 % de matière sèche on a :

- 1- Matière azotée totale : 11,83% dela matière sèche)
- 2- Cendres : 12,83 % dela matière sèche)
- 3- Amidon : 22,20 % dela matière sèche)
- 4- Cellulose : 17,34% dela matière sèche)

❖ **Matières Azotées totales :** Protéines absorbées par le tube digestif. On suppose que toutes les matières azotées comportent 16 % d'azote. La teneur en azote de l'aliment donnée par la méthode de Kjeldalsh est multipliée par 100/16 : N x 6,25. Les MAT comprennent les Matières Protéiques Brutes (MPB) et les Matières Azotées non protéiques. C'est une méthode d'appréciation de la qualité de la plante [16].

❖ **Cendre :** La cendre est un résidu principalement basique de la combustion, de l'incinération, de la pyrolyse de diverses matières organiques et minérales, et par extension de produits tels que le charbon, le lignite, le coke ou de divers déchets brûlés dans les incinérateurs, en plein air ou dans les cheminées ou fours [17].

❖ **Amidon** : L'amidon (du latin amyllum qui signifie non moulu) est un sucre complexe qui sert de réserve glucidique chez les végétaux. C'est l'équivalent du glycogène chez les animaux. L'amidon est un mélange de deux polysaccharides, l'amylose et l'amylopectine, dont les proportions sont variables selon les espèces (il faut en fait parler d'amidons au pluriel et non d'amidon). Il présente une formule générale $(C_6H_{10}O_5)_n$ où n est un entier compris en moyenne entre 500 et 1.000 [18].

❖ **Cellulose** : Est un bio-polymère composé exclusivement de molécules de β -glucose (de centaines à plusieurs milliers d'unités), car il s'agit d'un homopolysaccharide. La cellulose est la biomolécule organique la plus abondante puisqu'elle forme la plus grande partie de la biomasse terrestre [19].

❖ **Composition chimique**

- Teneur en eau..... 5 à 10% (3 à 5 points en dessous de celle des grains) ;
- Amidon et autres glucides.... 30 à 70 % ;
- Protides 6 à 20% ;
- Lipides.... 1 à 4 % ;
- Cendres..... 5 à 4 % ;
- Fibres.... 7 à 15%.

On trouve principalement les constituants des parties périphérique des grains entiers mélangés a ceux provenant des grains cassés et endommagés.

Les tenures de certains éléments minéraux peuvent différer de celles du grains et provenir de souillures étrangères. :

- On trouve environ 2 ppm d'arsenic (maxi 50) dans les poussières, alors que l'on n'en décèle pas dans le grain ;
- Les teneurs en plomb sont aux environs de 10ppm(maxi 20) alors que la teneur du grain est inférieure à 1 ppm ;
- Pour le calcium, le zinc, le manganèse, les propositions sont plus grandes dans les poussières que dans le grain ;
- On dose 20 à 40 fois plus de fer dans la poussière que dans le grain (cet enrichissement proviendrait de l'usure des moyens de transport) ;
- On constate pour le cuivre des quantités égales dans la poussière que dans les grains.

II-7. SANTE ET SECURITE PUBLIQUE PAR LA POUSSIERE EN SUSPENSION DANS L'AIR

L'homme respire de 8 à 12 m³ d'air par jour et les particules inhalées suivent les voies suivantes :

- Une partie est rejetée à l'expiration ;
- Une partie est arrêtée dans les voies supérieures de l'appareil respiratoire ;
- Une partie (la plus fine) pénètre dans les alvéoles pulmonaires et s'y dépose.

Les poussières sont de fines particules solides dispersées ou en suspension dans l'air (Les poussières dites respirables, c'est-à-dire d'un diamètre inférieur à 10 μm).

Ces particules sont soit « minérales », soit « organiques », selon leur provenance. Les poussières minérales peuvent provenir du broyage de métaux ou de minéraux, tels que la roche ou le sol. La silice, l'amiante et le charbon en sont des exemples.

Les particules en suspension dans l'air sont inhalées au cours de la respiration et déposées en différentes régions des voies respiratoires, qui constituent ainsi l'accès principal à l'organisme. La probabilité de passage à travers le nez ou la bouche et la probabilité de dépôt dépendent de nombreux paramètres [20] :

- Physiques (vitesse et direction du vent extérieur, diamètre aérodynamique des Particules) ;
- Anatomiques (calibres bronchiques, angles de ramification) ;
- Physiologiques (type de cycle respiratoire, volume courant, fréquence respiratoire).

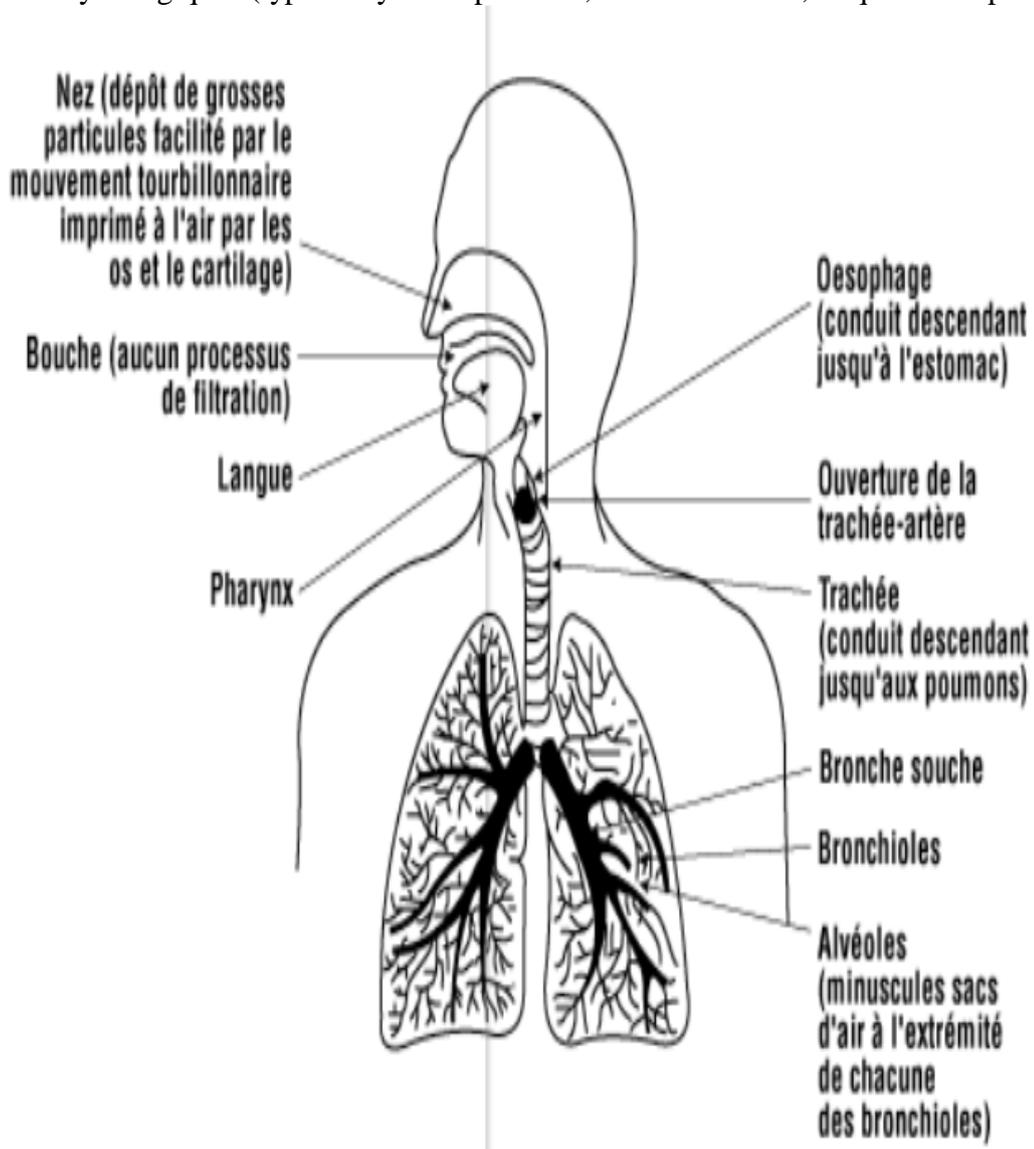


Figure II.2: Représente la pénétration des particules dans l'appareil respiratoire.

Les particules les plus grosses sont visibles à l'œil nu et provoquent souvent une gêne sensorielle. Hormis quelques cas assez rares, ces particules ne sont pas les plus inquiétantes pour la santé. En conséquence, la fraction alvéolaire représente la fraction la plus dangereuse pour la santé humaine du fait de la pénétration profonde des particules les plus fines dans les voies aériennes inférieures. Parmi les particules fines on distingue depuis quelques années les particules ultrafines qui sembleraient les plus nocives. En effet les particules ultrafines,

du fait de leur Taille (diamètre <100 nm), ont non seulement la faculté d'atteindre les ramifications les plus profondes des voies respiratoires mais ont des grandes facultés à franchir les barrières épithéliales (alvéolaires ou intestinales) et passer dans la circulation générale sanguine. Une autre de leur particularité est que, pour un volume inhalé équivalent, une particule de 5 µm équivaut à 12 500 particules de 100 nm représentant une surface 50 fois plus grande. Le nombre de ces très fines particules et leur grande surface spécifique augmentent d'autant les contacts avec les membranes et les molécules biologiques. Ces contacts, sources de radicaux, sont responsables, au moins en partie, de la toxicité des poussières qui possèdent un potentiel inflammatoire important, et ce pour des poussières qu'on pensait être « inertes » (silice amorphe...). Or l'inflammation est à l'origine.

II-7-1.DANGEROUSITE EN FONCTION DU SITE DE DEPOT

Le site de dépôt des particules est un paramètre très important dans l'expression de la toxicité des substances qu'elles contiennent. En effet, le transfert des substances vers le sang dépend de l'état physique des particules, de leur temps de séjour dans les différents compartiments (bronches, alvéoles) et de leur solubilité dynamique dans les fluides biologiques en contact (mucus bronchique, surfactant alvéolaire, contenu des lysosomes des macrophages). Ce temps de séjour dépend lui-même du site de dépôt en raison des mécanismes de clairance. Pour des particules solides déposées dans l'arbre trachéo-bronchique (fraction thoracique), il est de l'ordre de quelques heures à quelques jours tout au plus, alors que dans la région alvéolaire non ciliée il se chiffre en mois, voire en année. Par ailleurs, certains effets induits localement par les particules sont très variables en intensité suivant les sites, comme par exemple les phénomènes d'irritation ou le développement d'une fibrose qui concerne le poumon profond.

Les poussières peuvent également provenir de produits chimiques organiques (p. ex. teintures, pesticides). Cependant, le présent document ne traite que des particules de poussière pouvant causer une fibrose ou des allergies pulmonaires. Il ne porte pas sur les poussières chimiques à l'origine d'autres effets toxiques aigus, ni sur les effets à long terme comme le cancer.

Les poussières organiques proviennent de végétaux ou d'animaux. La poussière produite par la manipulation du grain en est un exemple. Ces poussières peuvent être composées de nombreuses substances. En plus de leur composante végétale ou animale, les poussières organiques peuvent aussi contenir des champignons ou des microbes, ainsi que les substances toxiques émanant des microbes. À titre d'exemple, l'histoplasmose, la psittacose et la fièvre sont des maladies que l'on peut contracter en inhalant des substances organiques contaminées par certains micro-organismes.

Les poussières alvéolaires étant les plus dangereuses et notamment en cas d'effet spécifique comme la silice, l'amiante, le plomb ou le béryllium par exemple, une attention toute particulière doit être apportée en ce qui concerne la santé au niveau de la pneumoconiose ou de la plombémie par exemple.

II-7-2.MALADIES LIEES AUX OPERATIONS SOULEVANT DE LA POUSSIERE

Les travailleurs peuvent souffrir de diverses maladies causées par la poussière qu'ils inhalent dans leur milieu de travail. Pour des raisons pratiques, le présent document traite uniquement de la poussière. Il ne tient pas compte des effets combinés résultant de l'exposition aux poussières, aux gaz, aux fumées et aux vapeurs.

Les changements qui se produisent dans les poumons varient en fonction des divers types de poussières. À titre d'exemple, les lésions attribuables à l'exposition à la silice sont caractérisées par des îlots de tissu cicatriciel entouré de tissu pulmonaire normal. Comme les zones atteintes sont séparées entre elles par du tissu sain, les poumons ne perdent pas complètement leur élasticité. En revanche, le tissu cicatriciel résultant d'une exposition à l'amiante, au béryllium et au cobalt recouvre entièrement les surfaces des voies aériennes inférieures, de telle sorte que les poumons se rigidifient et perdent leur élasticité.

Ce ne sont pas toutes les particules inhalées qui entraînent la formation du tissu cicatriciel. Les poussières de carbone et de fer, par exemple, demeurent captives des macrophages jusqu'à ce que ces derniers meurent de façon naturelle. Dès lors, les particules sont libérées, puis capturées par d'autres macrophages. Si la quantité de poussière dépasse la capacité d'absorption des macrophages, elle recouvre alors les parois internes des voies aériennes, sans qu'il y ait cicatrisation, ne causant ainsi que des lésions légères, voire aucune.

Certaines particules se dissolvent dans la circulation sanguine. Elles sont alors transportées par le sang vers différentes parties du corps, et elles peuvent alors affecter le cerveau, les reins et d'autres organes.

Pour désigner certains types de maladies pulmonaires causées par l'inhalation de poussière, on utilise le terme général « pneumoconiose ». Cela signifie simplement « poumon poussiéreux ».

Les poussières provoquent généralement des lésions pulmonaires et respiratoires, mais certaines d'entre elles peuvent être la cause de cancers. Les principales maladies associées à l'inhalation de poussières dangereuses sont les suivantes:

➤ ***Pneumopathie*** : Inflammation des tissus pulmonaires ou des bronchioles principalement causée par l'inhalation de certaines poussières métalliques. Ses symptômes sont analogues à ceux de la pneumonie mais varient en gravité, suivant le métal inhalé. Elle est le plus souvent due aux poussières de cadmium et de béryllium.

➤ ***Mésothéliome pleural*** : Tumeur des poumons, généralement causée par une exposition à l'amiante

➤ ***Cancer du poumon*** : Lui aussi peut découler d'une exposition à l'amiante [20].

➤ ***Pneumoconiose bénigne*** : Maladie causée lorsque des poussières apparemment inoffensives sont inhalées et s'accumulent dans les poumons au point de devenir visibles sur une radio. Elles n'endommagent pas les tissus pulmonaires et par conséquent, la maladie n'est pas invalidante. Cette affection est le plus souvent associée aux poussières de métaux tels que le fer et l'étain.

➤ **Pneumoconiose** : Nom collectif d'un groupe de maladies pulmonaires chroniques causées par l'inhalation de certaines poussières ; Une pneumoconiose est une affection pulmonaire due aux poussières. Il existe deux types de pneumoconioses :

- Les pneumoconioses d'origine végétale (grain de blé, riz)
- Les pneumoconioses d'origine minérale dont certaines ne sont que des maladies de surcharge qui n'entraînent pas de lésions pulmonaires de sclérose (ex : la sidérose, l'antracose, la stanoise).

Ce terme couvre plusieurs maladies baptisées d'après la poussière qui les a causées. Les plus connues sont:

- L'asbestose due à l'amiante
- la béryllose due au béryllium
- la silicose due silice
- La talcose due au talc

Une pneumoconiose dépend de plusieurs facteurs :

- La nature des minéraux
- La taille des particules
- La quantité de poussières
- La durée d'exposition

Par ailleurs, des facteurs, tels que la susceptibilité individuelle, les habitudes de vie, les infections virales et bactériennes peuvent notamment influencer l'évolution de la maladie.

D'autre part, au-delà des effets dus à la présence physique des particules suite à leur déposition dans le tractus respiratoire, il peut y avoir certains effets toxiques dus aux composés (métaux, organiques) qu'elles contiennent, en concentration plus ou moins importante.

Dans ce cadre, une attention particulière est apportée en ce qui concerne la santé du personnel au niveau de la pneumoconiose.

En carrière classique, la silicose est la seule pneumoconiose pouvant être développée.

Les formes amorphes sont peu nocives contrairement aux formes cristallines. Parmi celles-ci la tridymite et la cristobalite sont des formes qui apparaissent à haute température (roches volcaniques ou transformations industrielles)

La **quantité de poussières** déposée dans les alvéoles pulmonaires influence directement l'apparition d'une pneumoconiose.

Celle-ci est prise en compte à travers deux facteurs :

- La concentration en poussières
- La durée d'exposition

On distingue deux fractions de poussières qui sont :

- La fraction inhalable
- La fraction alvéolaire

Seule la fraction alvéolaire peut induire un risque de pneumoconiose minérale.[33]

Les effets de la poussière de farine sur la santé : sont tels que la production et l'utilisation de farines sont susceptibles de provoquer des affections respiratoires. Ainsi, les farines de blé, d'orge, d'avoine, du maïs, du sarrasin, du riz, de seigle sont considérées comme les causes principales de l'allergie du boulanger. Les additifs des farines tels que les enzymes et améliorants peuvent également être d'autres allergènes professionnels. Les allergies peuvent se présenter sous la forme de rhinite et d'asthme. La rhinite et l'asthme professionnel sont inscrits au tableau RG66 du régime général de la Sécurité Sociale.

L'eczéma est inscrit au tableau RG65 « Lésions eczématiformes de mécanisme allergique » du régime de la sécurité sociale. Les allergies dues aux enzymes sont inscrites au tableau RG63 « Affections provoquées par les enzymes ».

La rhinite et l'asthme professionnel sont inscrits dans le tableau RA45 du régime agricole « Affections respiratoires professionnelles de mécanisme allergique ».

L'eczéma, la conjonctivite et l'urticaire de contact sont inscrits au tableau RA 44 du régime agricole « Affections cutanées et muqueuses professionnelles de mécanisme allergique »

• **Réglementation :** Il n'existe pas de réglementation particulière pour l'exposition aux poussières de farine ; on se basera donc sur la réglementation concernant les poussières réputées sans effet spécifique. La VME (valeur moyenne d'exposition) pour les poussières totales est de $10\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ d'air. La VME (valeur moyenne d'exposition) pour les poussières alvéolaires est de $5\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ d'air [21].

La farine est la première cause d'asthme professionnel en France. L'asthme peut entraîner un handicap important en termes de qualité de vie et avoir des conséquences socioprofessionnelles.

Avec les poussières de céréales et l'alpha-amylase, elle est incriminée dans 25% des cas d'asthme professionnel, et ce pourcentage atteint 33 % chez les hommes. La rhinite comme l'asthme à la farine sont des maladies professionnelles. Mais seulement quelques dizaines de cas sont reconnus chaque année chez les salariés. C'est un chiffre notoirement sous-évalué, car c'est aux salariés de faire la déclaration et les personnes atteintes ne consultent pas forcément un médecin. Ces allergies peuvent survenir à tout moment de la vie professionnelle. Aucun boulanger ne peut affirmer, qu'un jour, il ne sera pas atteint. L'âge moyen de déclaration des rhinites est de 28 ans et de 43 ans pour les asthmes. Les poussières de farine les plus fines restent en suspension dans l'air. A la suite des expositions à ces poussières, l'homme peut se sensibiliser en fabriquant des protéines particulières, appelées anticorps, spécifiques de la farine. Lors des contacts ultérieurs, les antigènes spécifiques présents dans la poussière de farine se fixent sur ces anticorps, ce qui provoque des manifestations allergiques telles que rhinite, asthme, conjonctivite et plus rarement eczéma. Celles-ci peuvent survenir seules, ou le plus souvent associées. Dans un cas sur deux environ, l'asthme est précédé d'une rhinite pendant plusieurs années. La rhinite allergique est caractérisée par une inflammation localisée, aiguë ou chronique, de la muqueuse nasale. Il en résulte une obstruction des fosses nasales, des éternuements et un écoulement. Elle peut précéder l'apparition de l'asthme. L'asthme est une maladie chronique des voies aériennes qui se manifeste par des épisodes de gêne respiratoire, des accès de toux, une respiration sifflante et une sensation d'étouffement. Il est dû à un rétrécissement du diamètre des bronches du fait de spasmes associés à une inflammation et à une hypersécrétion de la muqueuse bronchique. Les crises d'asthme surviennent de façon intermittente.

Les poussées aiguës d'essoufflement sont séparées par des périodes sans trouble. Très souvent, les manifestations de rhinite et d'asthme surviennent immédiatement, ou peu après les expositions professionnelles à la farine, notamment lors des opérations de pétrissage ou de fleurage. Ces symptômes disparaissent en général complètement durant les jours de repos et les congés. Parfois, dans des formes d'asthmes plus évoluées, ils peuvent persister après la fin de l'exposition.

Les farines ont des propriétés irritantes qui, en cas d'exposition à des concentrations élevées dans l'air ou sur la peau, favorisent des manifestations d'irritation des tissus.

Ces expositions répétées constituent un facteur très favorable à la survenue de maladies allergiques (rhinite, asthme, conjonctivite, eczéma). On dit que «l'irritation fait le lit de l'allergie». Antigène : substance étrangère à l'organisme, capable de déclencher une réponse immunitaire, avec création d'anticorps visant à l'éliminer. Allergène : substance susceptible de déclencher une allergie. En France, 1 asthme professionnel sur 4 touche un boulanger ! En boulangerie artisanale, au moins 100 000 personnes sont concernées. « *MALADIES PROFESSIONNELLES, LES RÉACTIONS ALLERGIQUES AUX POUSSIÈRES DE FARINE* ».

II-8. CONCLUSION

Dans nos vies, la poussière est synonyme de corvées, du temps qui passe et de nuisances pour notre santé... et donc d'un combat permanent au quotidien. Dans le monde des nanotechnologies, les poussières sont des monstres qu'il faut traquer sans relâche dans les chambres blanches dont la construction génère, parallèlement, une activité industrielle et économique de grande ampleur. Au seuil de la perception humaine, ce matériau est aussi source d'inspiration pour les artistes.

DEUXIEME PARTIE : NOTIONS SUR LA POLLUTION

II-9. INTRODUCTION

Bien que d'usage banal, le terme pollution recouvre des acceptions fort diverses et qualifie une multitude d'actions qui dégradent d'une façon ou d'une autre le milieu naturel. Certes, le vocable désigne sans ambiguïté les effets des innombrables de composés toxiques rejetés par l'homme dans l'environnement ; cependant, il s'applique également à d'autres altérations du milieu de nature physique ou chimique (émission de dioxyde de carbone dans l'atmosphère par exemple) qui, sans être nocives par elles-mêmes pour la santé humaine, sont susceptibles de provoquer des perturbations écologiques d'ampleur catastrophique.[22]

Polluer signifie étymologiquement profaner, souiller, salir, dégrader. Ces termes ne prêtent pas à équivoque et paraissent tout aussi adéquats que les longues définitions données par les experts.

II-10. DEFINITION DE LA POLLUTION

Etymologie : du latin pollutio, salissure, souillure, tache.

On appelle pollution toute dégradation d'un écosystème ou de la biosphère par l'introduction généralement humaine par diffusion directe ou indirecte d'entités (physiques, chimiques ou biologiques), qui sont potentiellement toxiques pour les organismes vivants ou qui perturbent de manière plus ou moins importante le fonctionnement naturel des écosystèmes. Outre ses effets sur la santé humaine et animale, elle peut avoir pour conséquences la migration ou l'extinction de certaines espèces qui sont incapables de s'adapter à l'évolution de leur milieu naturel. [23]

❖ **Définition de la rousse** : Dégradation de l'environnement par des substances (naturelles, chimiques ou radioactives), des déchets (ménagers ou industriels) ou des nuisances diverses (sonores, lumineuses, thermiques, biologiques, etc.). Bien qu'elle puisse avoir une origine entièrement naturelle (éruption volcanique, par exemple), elle est principalement liée aux activités humaines.

En médecine, émission involontaire de sperme, souvent nocturne.

Synonymes : altération, contamination, souillure [24].

❖ **Définition de la pollution donnée par la Directive européenne** (2000/60/CE du 23 octobre 2000) : Introduction directe ou indirecte, par suite de l'activité humaine, de substances ou de chaleur dans l'air, l'eau ou le sol, susceptibles de porter atteinte à la santé humaine ou à la qualité des écosystèmes aquatiques ou des écosystèmes terrestres, qui entraînent des détériorations aux biens matériels, une détérioration ou une entrave à l'agrément de l'environnement ou à d'autres utilisations légitimes de ce dernier».

La pollution est en général un sous-produit de l'activité humaine qui peut toucher l'atmosphère, le sol ou les eaux. Elle peut affecter la santé humaine, l'eau de consommation, l'eau de baignade, la production agricole, les espèces animales ou végétales, la beauté des paysages, etc.

Par extension, pour les êtres humains, la pollution peut être la conséquence de toute perturbation de l'environnement qui, outre les effets sur la santé, en gêne une utilisation légitime. Synonyme : Nuisances. [25]

❖ **Le Dictionnaire de l'environnement, Les termes normalisés de l'AFNOR** définit le polluant comme un altéragène biologique, physique ou chimique, qui au-delà d'un certain seuil, et parfois dans certaines conditions (potentialisation), développe des impacts négatifs sur tout ou partie d'un écosystème ou de l'environnement en général.

Il est question de « pollution diffuse » lorsque les sources polluantes sont multiples (pots d'échappement, épandage de pesticides...), et de « pollution chronique » lors d'émissions répétées ou constantes de polluant, et parfois lorsqu'un polluant est très rémanent.

La notion de pollution appelle donc celle de contamination d'un ou plusieurs composants des écosystèmes (air, eau, sol), d'un organisme (qui peut être l'être humain) ou d'un groupe d'organismes, ou ayant une incidence sur l'écosystème, au-delà d'un seuil ou norme. La contamination peut notamment s'étendre ou se modifier via le réseau trophique (chaîne alimentaire) (bioconcentration, bioturbation).

❖ **La pollution considérée par l'ONU** : Comme la neuvième limite planétaire, « d'une part, en raison de ses effets néfastes sur le développement physiologique de l'homme et sur le fonctionnement des écosystèmes ; d'autre part, car elle agit comme une variable lente qui affecte d'autres limites planétaires. [26]

❖ **Définition de la pollution de l'air (conseil de l'Europe 14.09.67)**

« Il ya pollution de l'air, lorsque la présence d'une substance étrangère, ou une variation importante dans la proportion de ses constituant, est susceptible de provoquer un effet nuisible, compte tenue des connaissances scientifiques du moment ou de créer gêne »

Dans cette définition deux caractéristiques sont surtout importantes :

- a. Composition anormale de l'air.
- b. Notion de gêne ou de nocivité résultante.

En fait cette définition concerne principalement :

- Les pollutions résultats de l'activité humaine (pollution artificielle)
- Les cas où l'air ambiant est nuisible pour l'homme et/ou son entourage.

On peut distinguer aussi un certains types de pollution :

1. Les pollutions extérieures (ou pollutions générales), des pollutions intérieures (ambiances professionnelle ou micro-climat).
2. Les émissions captées, des émissions diffuses :
 - Les premières permettent l'installation aisée d'un système d'aspiration ;
 - Pour les seconds, la lutte est difficile.

En générale, la pollution est le résultat de l'action de salir, il est un peu repris dans ce sens, car beaucoup de pollutions profanent l'espace naturel et l'environnement humain.

Il existe de très nombreuses pollutions, qui peuvent être classées soit selon leur origine (pollutions organiques, chimiques, radioactive et autres...), Ces classifications correspondent à deux conceptions, à deux approches différentes des mêmes problèmes.

La classification selon l'origine est surtout utilisée par les techniciens, qui, partant d'une source de pollution, en étudiant toutes les conséquences. Celle selon le milieu est beaucoup plus courante, car elle correspond aux réactions du grand public, qui constate les atteintes à son environnement. [13]

II-11. HISTOIRE DE LA POLLUTION

La pollution vient du latin polluere (luo, « baigner », avec le préfixe por-) qui signifie «souiller en mouillant », « salir » et surtout « profaner ».

Historiquement, la pollution est la profanation ou la souillure d'un objet ou d'une demeure sacrée par des substances impures. Le mot a donc une origine clairement culturelle. Selon les universitaires François Jarrige et Thomas Le Roux, c'est en Grande-Bretagne que « le mot pollution apparaît dans le sens contemporain que nous lui connaissons : dans la sphère juridique, il est employé, semble-t-il pour la première fois en 1804, dans une cour de justice écossaise pour condamner des tanneurs ayant altéré une rivière par leurs rejets, par les expressions pollution of the stream et pollution of water ».

La pollution commence dès la préhistoire, avec la maîtrise du feu : « la suie trouvée sur le plafond des grottes préhistoriques est une preuve évidente de ce que les foyers entraînaient un niveau élevé de pollution du fait d'une ventilation insuffisante ».

La métallurgie de l'âge du bronze, puis de l'âge du fer, a marqué un tournant dans la pollution de l'environnement extérieur. Les carottages des glaciers du Groenland ont révélé un accroissement de la pollution associée à la métallurgie des Grecs, des Romains et des Chinois. Mais à cette époque, la pollution était comparativement faible, et n'avait pas d'impact environnemental significatif.

Les concentrations urbaines ont constitué la source majeure de pollution tout au long de notre histoire. Les villes concentraient la présence et les déjections de nombreux hommes et de chevaux, conduisant à des pollutions de l'air et de l'eau. La nécessité de les évacuer (dans l'eau courante du fleuve) a conduit aux premiers systèmes d'égouts comme le Cloaca Maxima. C'est à cause de la puanteur qu'elles dégagent que les tanneries ont de tout temps été excentrées et placées en aval des villes. La combustion massive de bois et de charbon conduit également à des pollutions de l'air. Ainsi, en Angleterre, Édouard Ier édicta en 1272 une proclamation interdisant l'usage de la houille bitumineuse à Londres, alors d'usage très courant, après que la fumée que produisait son usage massif soit devenue insupportable.

Le développement des métropoles aggrava le problème. Londres connu ainsi l'un des pires cas de pollution de l'eau avec la Grande Puanteur de 1858, qui entraîna la construction d'égouts à grande échelle et une nouvelle politique appelée « révolution sanitaire », et le mouvement hygiéniste. Berlin était dans une situation similaire en 1870, comme en témoigne August Bebel :

« Les eaux usées sortent des maisons pour couler dans les caniveaux, dégageant une puanteur épouvantable. Il n'y a pas de toilettes publiques dans les rues ; les gens de passages, et particulièrement les femmes, sont souvent sans ressource quand la nature rappelle ses exigences. Dans les bâtiments publics, les installations sanitaires étaient incroyablement primitives. En tant que métropole, ce n'est qu'après 1870 que Berlin est passée de la barbarie à la civilisation ».

C'est la révolution industrielle qui a conduit la pollution aux niveaux connus de nos jours. La combustion massive de charbon amena la pollution de l'air à des niveaux sans précédents, les industries déchargèrent leurs effluents chimiques et leurs déchets sans traitements particuliers, polluant les cours d'eau, les nappes phréatiques et les sources d'eau potable.

En Amérique, Chicago et Cincinnati furent les deux premières villes à passer des réglementations pour lutter contre la pollution de l'air. Vers le milieu du XX^{ème} siècle, le smog provoqué par les échappements automobiles était devenu un problème majeur dans des villes comme Los Angeles, ou Donora.

Londres connut son pire épisode de pollution atmosphérique avec le Grand Smog de 1952, dont on estime qu'il a pu faire 12 000 morts.

D'autres catastrophes environnementales dues à de la pollution chimique massive conduisirent à une sensibilisation croissante de l'opinion : Scandale de Love Canal, intoxications massives au mercure de Minamata au Japon, etc...

C'est à la suite de tels événements que la préoccupation environnementaliste se développa, et que des lois et conventions internationales furent développées pour lutter contre la pollution [27].

II-11. IMPORTANCE ECONOMIQUE DU BLE

A l'origine de principales pollutions se trouvent le souci de se débarrasser aux moindres frais d'un produit gênant. On rejette à la rivière, à la mer, dans l'air, dans une décharge les résidus, les déchets sans se soucier des conséquences de ces rejets.

L'argument le plus utilisé pour justifier cette opération est une notion d'économie, ce qui n'est pas toujours vrai, Par contre, le cout de dépollution ou la non-pollution est une certitude. Les équipements nécessaires exigent des investissements importants ; de plus leur entretien représente évidemment sur le prix de revient des produits considérés.

Mais il existe un grand nombre de cas pour lesquels la dépollution est, au contraire, rentable (circuit fermé des eaux industrielles, dépoussiérage avec récupération, traitement des eaux avec récupérations des matières premières été...).

Les oppositions à la dépollution viennent surtout des nouvelles contraintes que celles-ci imposent aux personnes concernées. [13]

II-10-1. CAS DE L'ALGERIE

La production nationale de blé ne contribue qu'à 20% de la consommation humaine, donc la différence est comblée par les importances qui peuvent occuper pour certaines années 80% des disponibilités nationales. La quantité moyenne importée durant la dernière décennie dépasse les quatre millions de tonnes par an, pour une facture de 730 millions de dollars. Ainsi les importations, qui étaient de l'ordre de 500 000 quintaux par an durant la décennie en 1920, soit 27 kg par personne, sont passées à quatre millions de quintaux en 1960, selon (Bencharif et al, 1996), c'est-à-dire 40 kg par personnes. Elles ont atteint 60 millions de quintaux en 2005, pour un cout de 500 millions de dollars américains, soit 43% de la valeur globale des importations du pays.

Cette quantité place l'Algérie parmi les plus gros importateurs mondiaux de céréales, en occupant 65% du marché africain. Représentées en majorité par le blé dur (14 millions de quintaux), le blé tendre (26 millions de quintaux), l'orge (16 millions de quintaux), les plus importantes quantités sont achetées à la France (CNIS 2005).

Les importations jouent un rôle clé dans l'approvisionnement du marché national des céréales, Les très faibles progrès enregistrés par la production domestique de grains condamneront l'état à rechercher les moyens d'une gestion rationnelle des approvisionnements à l'extérieur, adaptés aux ressources budgétaires du moment, mais offrant une garantie contre les risques de pénurie, toujours vécus sur le monde dramatique. [28]

II-11. CLASSIFICATION DES POLLUTIONS SELON LES SOURCES

On peut classer les sources de pollution de la façon suivante :

II-11-1. POLLUTION AGRICOLE

La Pollution agricole fait référence aux sous-produits biotiques et abiotiques des pratiques agricoles qui entraînent une contamination ou une dégradation de l'environnement et des écosystèmes environnants, et / ou causent des dommages aux humains et à leurs intérêts économiques. La pollution peut provenir de diverses sources, allant de la pollution ponctuelle de l'eau (à partir d'un point de rejet unique) à des causes plus diffuses au niveau du paysage, également appelées pollution de source non ponctuelle.

Les engrais apportent aux végétaux cultivés les nutriments nécessaires à leur croissance. Les trois principaux sont : L'azote, le phosphore et le potassium. Les trois éléments que sont l'hydrogène, le carbone et l'oxygène, nécessaires à l'activité de photosynthèse sont apportés par l'air et l'eau. Enfin, le fer, le soufre ou encore le calcium est puisé directement dans la terre.

Les pesticides sont des produits chimiques destinés à détruire les champignons (fongicides), les mauvaises herbes (herbicides), les vers de terre (nématocides) et insectes (insecticides) qui parasitent les cultures.

Le ruissellement des eaux de pluie ou d'arrosage drainent le sol et transportent vers des cours d'eau les produits de traitement des cultures (engrais et pesticides).

Les infiltrations d'eau, de pluie ou d'arrosage, entraînent vers les nappes phréatiques les mêmes produits de traitement des cultures (engrais et pesticides).

II-11-2. POLLUTION BIOLOGIQUE

Par définition, une pollution biologique est issue du milieu lui-même. C'est par le surdéveloppement de micro-organismes ou de végétaux micro ou macroscopiques qu'un déséquilibre du milieu environnant peut entraîner une mortalité élevée chez les autres organismes présents. Ce surdéveloppement est généralement la conséquence d'une action humaine : enrichissement en nitrates d'un milieu (rejets organiques), développement de virus, de bactéries, modification de la température d'un milieu (rejet d'eau chaude), introduction d'espèces invasives, etc.....

II-11-3. POLLUTION MARITIME

La pollution marine consiste en la présence de déchets dans les océans, ou bien résulte du rejet dans l'environnement par les activités humaines de quantités excessives de produits physiques ou chimiques toxiques, ou de déchets abandonnés par l'homme sur les sols, qui viennent polluer les fleuves et se retrouvent finalement dans les mers.

Cette pollution arrive dans le milieu marin via le ruissellement et les cours d'eau, ou est apportée par les vents et les pluies, ou provient de produits et objets volontairement ou accidentellement rejetés à la mer. La pollution entraîne la disparition de certaines espèces.

1- Les marées noires :

Les marées noires sont des accidents qui sont bien souvent la cause de négligences au niveau de l'entretien des navires ou la conséquence d'erreurs de navigation qui provoquent des collisions entre navires ou des échouages.

En décembre 1999, l'Erika a perdu 18000 tonnes de fuel, dont seulement 1000 ont été récupérées. Un des nombreux impacts de cette catastrophe a été la mort d'environ 300 000 oiseaux marins.

En novembre 2002, le Prestige, transportant 77000 tonnes de fuel laisse échapper des milliers de litres d'hydrocarbure par un brèche occasionnée dans la coque par le mauvais temps. Le 19 novembre, il se brise et coule. Là encore, l'état du pétrolier est mis en cause.... L'histoire se répète !

2- Accidents (Pollutions chimiques) :

Levoli Sun sombre le 30 novembre 2000 suite à un problème technique et des conditions météo très défavorables.

- 4000 Tonnes de styrène (hydrocarbure utilisé par exemple pour la fabrication du polystyrène) ;
- 1000 Tonnes de méthyl-éthyl cétone (solvant du groupe de l'acétone) ;
- 1000 Tonnes d'alcool iso-propylique (solvant).

3- Dégazages :

Les nappes forment une très fine couche et peuvent s'étendre sur plusieurs kilomètres. Celles qui sont rabattues sur les côtes affectent directement les espèces qui vivent dans la zone battue par les vagues comme par exemple les Littorines, les Patelles, les Crabes, les Algues trottoirs ou encore les Oiseaux marins.

II-11-4. POLLUTION PAR LES DECHETS SOLIDES

Les déchets solides, qu'ils soient de papier, de carton ou en plastique, souillent nos plages, nos calanques comme ils souillent les rues de nos villes et les prairies de nos campagnes.

Il y en a partout et sont la preuve d'un manquement grave de la part de nombreux individus au respect des éléments que sont la Terre et l'eau, sources de la vie.

La nature réagit aux blessures que l'homme lui cause. Elle s'adapte, elle évolue et tend toujours à retrouver un équilibre. Mais suivant la gravité de ses blessures, le temps de « réparation » peut être très long Beaucoup trop long dans le cas des déchets solides pour absorber les écarts de comportement de l'homme.

La défense naturelle contre les déchets solides s'appelle la **biodégradation** qui est définie comme étant la décomposition de certaines substances par des organismes vivants (bactéries).

Tous les matériaux ne sont pas biodégradables, par contre, ils sont tous soumis à l'**érosion** qui se traduit par une usure avec le temps. Certains, comme les métaux, subissent une **oxydation** qui a aussi un effet de réduction, ou de dégradation.

Certains déchets comme les pneus, les bouteilles en verre, mettent plusieurs milliers d'années pour disparaître.

II-11-5. POLLUTION PAR LES DECHETS DOMESTIQUES

Le secteur domestique est la première source d'émissions de composés organiques volatils non méthaniques (**COVnm**) et de particules pm10 et pm2,5. En particulier, le chauffage au bois dans des cheminées peu performantes est une source importante de particules fines. Les pics de pollution observés en hiver sont en général liés à cette source d'énergie. Le remplacement des cheminées ouvertes par des équipements plus performants tels que les poêles fermés classés flamme verte 5 étoiles permet de réduire les émissions de particules. Des aides existent pour inciter à ce changement. [29]

II-11-6. POLLUTION LIEE AUX TRANSPORTS

Dans ce secteur, on prend en considération les émissions de polluants inhérentes non seulement au transport routier, mais également aux transports aérien, ferroviaire, maritime ou fluvial.

Ces émissions de polluants sont le fait de la combustion des énergies fossiles, mais aussi de l'abrasion des pièces mécaniques, entre elles ou avec les supports avec lesquelles elles sont en contact, comme la route.

Le secteur des transports fait l'objet d'une attention toute particulière des autorités nationales et européennes qui imposent des normes d'émissions toujours plus exigeantes. Les constructeurs ont donc adopté des démarches de recherche-développement vertueuses et produisent des véhicules toujours plus performants d'un point de vue environnemental. Les émissions liées au transport diminuent donc depuis une quinzaine d'années. Toutefois, ces résultats ont longtemps été contrebalancés par une croissance continue du trafic, dans le domaine du transport routier notamment [30].

II-11-7. POLLUTION D'ORIGINE NATURELLE

La pollution géogénique (c'est-à-dire d'origine naturelle) des sols, des sédiments et des eaux constitue aujourd'hui un enjeu majeur. Au Mexique, en Argentine, aux Etats-Unis, une partie de la pollution boirait elle aussi de l'eau naturellement contaminée à l'arsenic. En Europe de l'est dans la région montagneuse des Balkans, entre la frontière roumaine et hongroise, plusieurs centaines de milliers de personnes seraient concernées également. Les roches des chaînes montagneuses sont en effet riches en polluants naturels (exemple : éruptions volcaniques, érosion des roches...) [31].

II-11-8. POLLUTION INDUSTRIELLE

Désigne la part de la pollution de l'environnement directement induite par l'Industrie quand elle introduit des altéragènes biologiques, physiques (dont radiations telles que la radioactivité ou dans la lumière artificielle quand elle perturbe l'environnement nocturne), chimiques ou organiques, affectant de manière plus ou moins importante le fonctionnement de l'écosystème.

II-11-8-1. FORMES DES REJETS INDUSTRIELS

Les rejets industriels sont des formes suivantes :

❖ FUMÉES

Les fumées rejetées par les usines contiennent des gaz acides toxiques qui retombent avec la pluie (ex: SO₂, oxyde de soufre). On parle alors de pluies acides qui sont néfastes pour la végétation et les êtres vivants. A cela s'ajoutent les émissions de CO₂ (dioxyde de carbone) et de CO (monoxyde de carbone), très toxique.

❖ EAU

Une usine qui utilise, puis rejette de l'eau pour son processus doit être équipée d'une station d'épuration. Un traitement primaire élimine les matières en suspension (ex: résidus de lavage, corps gras, huile), puis un traitement secondaire élimine les matières en solution (ex: produits chimiques, métaux lourds). En réalité, seulement 65% des eaux usées passent en station d'épuration et le traitement secondaire n'est généralement pas mis en application (bien souvent pour des raisons de coût).

❖ AIR

Les usines utilisent très fréquemment des systèmes d'aspiration de poussières dans leur processus de fabrication. Cet air doit être filtré avant d'être rejeté à l'extérieur, tout comme celui des gaines de ventilation ou de conditionnement sous haute température. [32]

Après avoir classé « notre pollution » qui est du type industriel, il est à retenir que tous les processus technologiques et les opérations de transport des grains dans les entreprises de transformations ou d'entreposage des céréales dégagent énormément de poussière donc la pollution de l'atmosphère de l'environnement et/ou l'atmosphère à l'intérieur du local (microclimat).

Bien que cela paraisse superflu, la pollution par les poussières agro-alimentaires ne présente pas un aspect aussi nocif et agressif pour la santé de l'ouvrier que celui présenté par les poussières de ciment, d'amiante ou autres.

Mais il en résulte qu'une exposition accentuée dans une atmosphère poussiéreuse est l'un des risques les plus courants auxquels sont soumis les ouvriers.

Cette exposition est fonction de la concentration (en poussière) maximale admissible dans l'air ou la santé de l'ouvrier n'est pas affectée si cette limite est observée. D'après les spécialistes, elle est limitée à 10 mg/m³ (concentration gravimétrique).

C'est en concentration à 10 mg/m³ que les combustibles deviennent explosibles.

Toutefois le respect des concentrations en poussières dans les locaux de transformation des céréales, conformes aux normes éditées ci-dessus pour la santé de l'homme, il n'y aurait pratiquement aucun risque d'explosion.

❖ **DECHETS**

Une usine doit aussi trier ses déchets et favoriser le recyclage (on parle alors de valorisation des déchets). Les déchets contenant des éléments nocifs doivent être récupérés et traités par des sociétés spécialisées (huiles, solvants, acides, piles, composants électroniques, tubes néon, ...).

Après avoir classé « notre pollution » qui est du type industriel, il est à retenir que tous les processus technologiques et les opérations de transport des grains dans les entreprises de transformations ou d'entreposage des céréales dégagent énormément de poussière donc la pollution de l'atmosphère de l'environnement et/ou l'atmosphère à l'intérieur du local (microclimat).

Bien que cela paraisse superflu, la pollution par les poussières agro-alimentaires ne présente pas un aspect aussi nocif et agressif pour la santé de l'ouvrier que celui présenté par les poussières de ciment, d'amiante ou autres.

Mais il en résulte qu'une exposition accentuée dans une atmosphère poussiéreuse est l'un des risques les plus courants auxquels sont soumis les ouvriers.

Cette exposition est fonction de la concentration (en poussière) maximale admissible dans l'air ou la santé de l'ouvrier n'est pas affectée si cette limite est observée. D'après les spécialistes, elle est limitée à 10 mg/m³ (concentration gravimétrique).

C'est en concentration à 10 mg/m³ que les combustibles deviennent explosibles.

Toutefois le respect des concentrations en poussières dans les locaux de transformation des céréales, conformes aux normes édictées ci-dessus pour la santé de l'homme, il n'y aurait pratiquement aucun risque d'explosion

II-13. EFFETS DE LA POLLUTION CAUSEE PAR LA POUSSIERE

II-13-1. INTRODUCTION

Les poussières peuvent provoquer, compte tenu de leur diffusion dans l'atmosphère, trois types d'effets :

- Pollution atmosphérique ;
- Pollution minérale des eaux ;
- Pollution affectant la santé et la sécurité publique.

II-13-2. POLLUTION ATMOSPHERIQUE

Ce sont les nuisances engendrées par la retombée des poussières avec impact sur la végétation, le paysage, les habitants et monuments, l'agriculture, si les retombées sont importantes.

❖ Définitions de l'air :

L'air atmosphérique est un mélange de plusieurs gaz et d'humidité. Composition : azote, oxygène, dioxyde de carbone, ainsi que de poussières et des polluants.

❖ Définition de l'air selon l'ADEME :

L'air de l'atmosphère comprend pour l'essentiel, de l'azote (78 %), de l'oxygène (21 %), des gaz rares (argon, néon, hélium, etc.) et dans les basses couches, de la vapeur d'eau et du dioxyde de carbone. De nombreux gaz polluants et particules s'ajoutent à ces composés.

• Rapprochement des définitions entre pollution de l'air extérieur et l'air intérieur

Dans le domaine de la pollution atmosphérique, et plus particulièrement la surveillance de la qualité de l'air, on distingue l'air ambiant de l'air à l'intérieur des locaux, qui lui-même est catégorisé en « air intérieur du lieu de travail », en « air intérieur des lieux publics » et en « air intérieur des lieux privés » [33].

II-13-3. POLLUTION MINERALE DES EAUX

La pollution de l'eau par lessivage des poussières déposées sur le sol lors des chutes d'eau ou aspersion des pistes de circulation des engins.

Les poussières constituent des effets indirects, temporaires ou permanents liés à l'exploitation de la carrière, au roulage, au transport ou au traitement des matériaux.

II-13-4. EFFETS SUR LA SANTE HUMAINE

Les pollutions nuisent à l'organisme par contact (peau et muqueuse) par déglutition, par inhalation et contact avec les muqueuses pulmonaires.

L'état physicochimique des polluants joue un rôle important quant aux effets produits. Pour pénétrer dans les bronches, ils doivent être sous forme de particules infiniment petites.

Les plus dangereuses pour les poumons sont celles de 1 µm car elles correspondent à la rétention alvéolaire maximum.

Une exposition continue est plus nocive qu'une exposition discontinue à des teneurs plus élevées (phénomène de récupération et processus de détoxification).

L'inhalation de poussières de céréales a été rendue responsable d'un syndrome appelé fièvre des céréales ou maladie des batteurs en grange.

L'atteinte aiguë, consiste en un syndrome pseudo-grippal : fièvre, frissons, asthénie, courbatures et tissu productive, parfois des crises asthmati-formes. L'arrêt de l'exposition entraîne en général la guérison sans séquelle. L'exposition répétée peut néanmoins engendrer un état de bronchite chronique avec une insuffisance respiratoire.

La pathogénie de cette affection est encore imprécise : action directe de poussières, contamination bactérienne ou mycosique, réaction immunologique aux poussières de céréales.

II-13-4-1. MICROFLORE DES POUSSIÈRES RESPIRÉES DANS LES SILOS

On apprécie la concentration en poussière de l'air respirable (diamètre de particules solides inférieures à 7 microns) en la prélevant à 1,5m du sol ; le maximum admis par l'O.S.H.A est de 15 mg/m³. L'importance de la microflore est très variable selon la propreté du silo.

Les travailleurs de grains sont plus exposés aux moisissures et bactéries que d'autres, mais on ne peut attribuer avec certitude la responsabilité de maladies chroniques non spécifiques des poumons à la présence parmi les poussières de spores de moisissures, de pesticides...

L'existence dans les poussières de grains, de particules de farine et de son, porte à penser qu'elles peuvent provoquer les symptômes d'allergie analogue à l'asthme du boulanger.

En Australie, on signale une irritation de la peau due à la poussière d'orge CLIPPER que l'on appelle gale de CLIPPER.

II-13-4-2. FARINE

L'exposition aux poussières de la farine peut engendrer un syndrome asthmatique ou de la bronchite chronique.

Tableau II.3 : l'affection due à l'exposition aux poussières de la farine

Nom de l'affection	Type d'exposition	Nature de l'antigène
« Wheat weevil disease » La maladie des charcuçons du blé	Farine contaminée	Sitophilus granarius

II-13-4-3. ASTHME PROFESSIONNEL

C'est un trouble respiratoire caractérisé par une obstruction réversible des voies respiratoires, causé par l'inhalation de substances présentes au poste de travail.

Cette définition englobe une série de troubles respiratoires dont certains résultent d'un processus immunologique.

L'affection se manifeste chimiquement par de la constriction thoracique, de la toux, du « wheezink » et de la dyspnée et fonctionnellement par des perturbations réversibles de la ventilation pulmonaire.

L'exposition répétée peut finalement engendrer un syndrome obstructif irréversible.

Les substances responsables d'asthme professionnel sont soit des antigènes complets ou des antigènes incomplets (haptènes) qui sont aussi connus pour leur aptitude à déclencher des eczémas de contact.

Parmi les allergènes organiques complets capables d'engendrer de l'asthme, nous trouvons : les phanères et les excréta d'animaux (risques pour les techniciens de laboratoires), le grain, la farine (boulangers, meuniers...).

N.B Aucune maladie professionnelle n'est déclarée au niveau de la «CNASAT » c'est due peut-être à l'absence de la « *MEDECINE DU TRAVAIL* »

II-13-4.4. AFFECTIONS RESPIRATOIRES PROFESSIONNELLES DE MECANISME ALLERGIQUE

Tableau II .4 : Affections respiratoires professionnelles de mécanisme allergique

Définition des maladies	Délai de prise en charge	Travaux susceptibles de provoquer ces maladies
Syndrome dyspnéique paroxystique, confirmé par test ou par épreuves fonctionnelles, récidivant après nouvelle exposition à l'agent pathogène	7 jours	-Travaux exposant à l'inhalation de poussières provenant : -du broyage des grains des céréales alimentaires : blé, orge, seigle, ainsi que l'ensachage de la farine et de son utilisation industrielle.
Fibrose pulmonaire avec signes radiographiques et troubles respiratoires confirmés par l'exploration fonctionnelle lorsqu'il y a des signes immunologiques significatifs.	1 an	-Travaux exposant à l'inhalation de poussières provenant du broyage des graines de céréales alimentaires : blé, orge, seigle ainsi que l'ensachage de la farine et son utilisation industrielle.

II-13-5. SUR LES VEGETAUX

Suite aux incidences induites par le mauvais fonctionnement d'un filtre ou d'un cyclone ou autres anomalies dans le circuit d'aspiration.

Les poussières rejetées dans l'atmosphère extérieure se répandent sur la végétation, les infrastructures proches de l'entreprise.

De part leur seule présence dans l'air, elles réduisent l'insolation et donc la photosynthèse des végétaux, D'autre part, en se déposant sur les feuilles, elles peuvent obstruer les stomates, et donc réduire la photosynthèse en limitant les échanges gazeux.

II-13-6. SUR LES CONDITIONS GENERALES DU CONFORT ET SUR LES MATERIAUX

Par là, on entend les dommages causés par la pollution atmosphérique à l'environnement non vivant de l'homme.

Ils sont une perte économique directe :

- Les eaux pluviales entraînent toutes les poussières qui s'accumulent sur les toits et les terrasses pour poursuivre son chemin à travers les chéneaux et les conduits d'eau ;

En grande quantité ces poussières forment avec l'eau une espèce de pâte qui pourrait obstruer l'écoulement de ces eaux et provoquer par conséquent des inondations.

- Diminution de la résistance ou destruction des matières textiles, des cuirs...etc ;
- Usure des organes en mouvement (pignons, bagues...)

La perte économique indirecte.

- Les frais d'habillement dus à l'usure anormale résultant de nettoyage plus fréquents ...etc ;
- Insalubrité (frais sur les produits d'entretien, balais, brosse...).

II-14. COMPORTEMENT ET MOYENS DE DEFENSE

Les poumons sont les organes de la respiration : ils ont pour rôle d'extraire l'oxygène contenu dans l'air ambiant, puis de l'amener dans le sang en suivant une série de conduits ramifiés et, à l'inverse, d'expulser le gaz carbonique présent dans le sang en le retournant à l'air ambiant. Les poumons sont protégés par une série de mécanismes de défense situés dans différentes zones des voies respiratoires.

En règle générale, plus le diamètre des particules est petit, plus l'élimination pulmonaire par les bronches et les alvéoles est efficace. Cependant, l'élimination des particules par les poumons est un phénomène très lent. Les particules de diamètre aérodynamique supérieur à 100 μm sont arrêtées au niveau du nez, elles sont bloquées jusqu'à ce qu'elles en soient expulsées mécaniquement, au moment où l'on se mouche ou que l'on éternue, et celles entre 20 et 100 μm sont arrêtées dans la partie supérieure de l'arbre respiratoire elles sont donc éliminées par filtration.

Les particules de diamètre aérodynamique compris entre 5 et 20 μm peuvent atteindre la zone de conduction à travers la cavité nasale (de la trachée aux bronchioles terminales), elles vont pouvoir bénéficier d'une épuration mucociliaire rapide. Elles seront éliminées par des phénomènes naturels (toux, filtration par les cils de l'arbre respiratoire...).

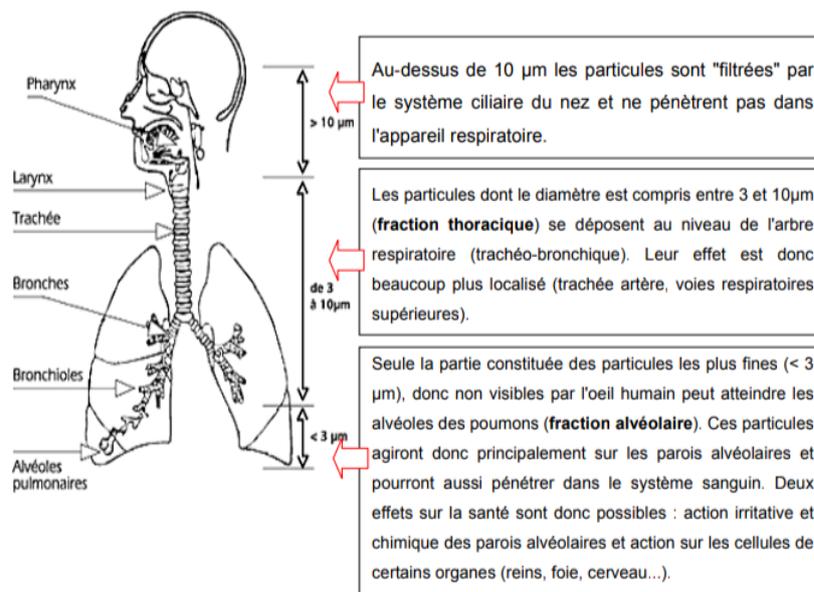


Figure II-3: Fiche d'information Réponses intitulée comment les matières Particulaires passent-elles dans l'appareil respiratoire

Ces conduits sont appelés des bronches souches et des bronchioles. Toutes ces voies aériennes sont couvertes de cellules. Le mucus sécrété par ces cellules emprisonne la plupart des particules de poussières. Les cils vibratiles, de minuscules poils recouvrant les parois des conduits aériens, dirigent ensuite ce mucus jusqu'à la gorge, où il est éliminé par toux et expectoration ou avalé.

Les particules de diamètre aérodynamique inférieur à 5 μm (et une faible fraction Des particules de diamètre compris entre 5 et 10 μm) atteignent la zone d'échange :

- Bronchioles respiratoires et alvéoles. Ces particules vont être phagocytées par les macrophages alvéolaires et pour l'essentiel, être véhiculées vers l'interstitium pulmonaire ;
- Puis être drainées vers le système lymphatique. Ce processus dure plusieurs mois ou années. Une faible fraction est par ailleurs véhiculée vers la zone de conduction et rejoint le tapis mucociliaire bronchique.

En fin les particules de poussière inférieures à 3 μm ont traversé les défenses de la cavité nasale et des voies aériennes, atteint les minuscules sacs alvéolaires (alvéoles) situés à l'intérieur des poumons. Ces sacs alvéolaires sont essentiels, car c'est grâce à eux que le corps reçoit de l'oxygène et élimine le gaz carbonique.

Lorsque les particules de poussière atteignent les sacs alvéolaires et les voies aériennes inférieures, tous deux dépourvus de cils vibratiles, elles sont attaquées par des cellules spéciales appelées des macrophages. Ces macrophages sont une composante extrêmement importante des défenses pulmonaires, puisqu'ils empêchent l'accumulation de corps étrangers dans les sacs alvéolaires. Les macrophages avalent littéralement les particules puis, selon un mécanisme encore mal connu, atteignent la région où les voies aériennes sont tapissées de cils vibratiles. Ces cils, animés de mouvements ondulatoires, font ensuite remonter les macrophages jusque dans la gorge, où ils sont expulsés par la bouche ou avalés.

Outre les macrophages, les poumons sont dotés d'un autre système de défense qui leur permet d'éliminer la poussière. Ils peuvent se défendre contre la présence de particules porteuses de germes en produisant certaines protéines qui se lient à ces particules pour les neutraliser.

Notre organisme possède des mécanismes de défense que lors de la pénétration des particules dans les voies respiratoires vont se mettre en action pour tenter de rejeter vers l'extérieur la masse des particules.

- La filtration nasale : Les particules se déposent dans le nez par filtration et leur rétention est favorisée par le mucus qui recouvre les parois nasales ;
- Mécanisme de clearance : Dans la trachée et les bronches, l'épithélium cilié est recouvert par du mucus, les cils en mouvement continu et synchronisé remontent le mucus vers le haut, les particules vont donc être évacuées par la bouche et par le nez ;
- Mécanisme de la toux et des éternuements : Le réflexe de tousser est déterminé, vont créer des courants d'air à l'intérieur de l'appareil respiratoire et contribuent aussi à évacuer les particules vers le haut ;
- Phagocytose : L'épithélium de surfaces pulmonaires n'est pas cilié aussi, les fines particules arrivent jusqu'aux poumons et vont être englouties par les cellules macrophages. La cellule a ensuite 3 possibilités Soient:

- Remonter vers l'épithélium cilié et être éliminée hors des voies respiratoires ;
- Rester dans les poumons ;
- Entrer dans la circulation sanguine. [34]

II-15. RETENTION DES PARTICULES DE POUSSIÈRES DANS LES VOIES RESPIRATOIRES

Ci-après les courbes montrant le pourcentage de particules de poussières déposées sur les différentes parties des voies respiratoires.

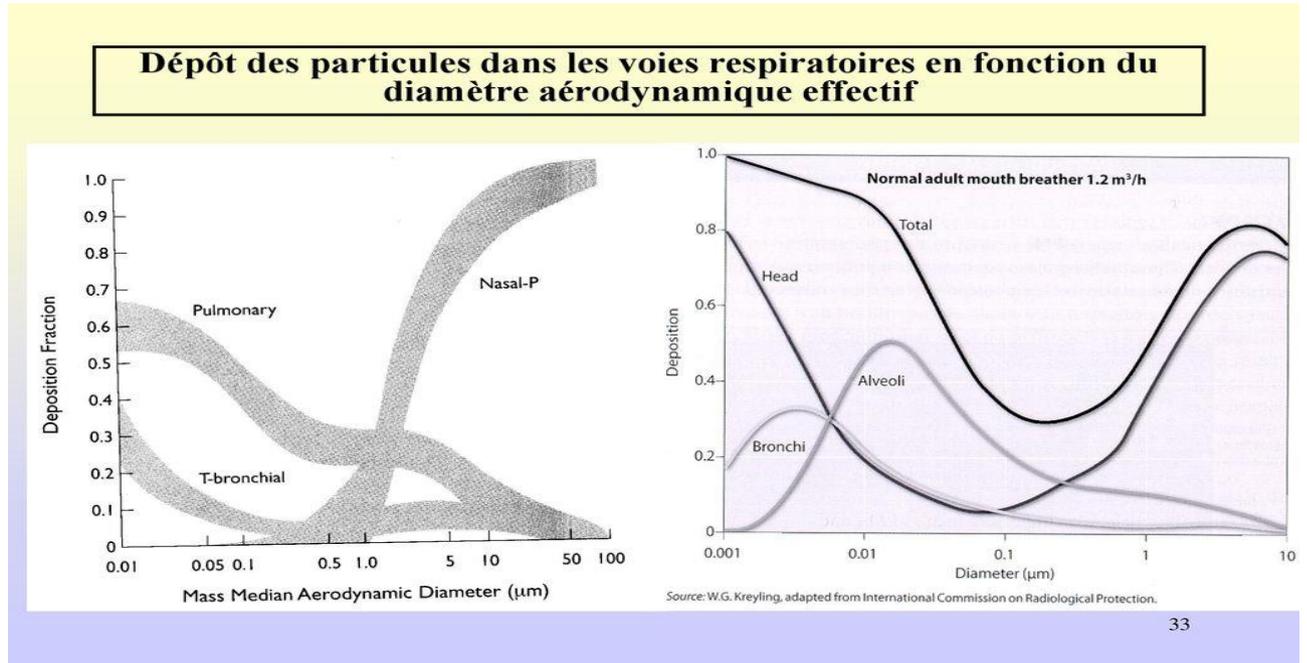


Figure II-4 : Courbe de déposition des particules dans les voies respiratoires en fonction de leur diamètre aérodynamique

Les particules de diamètre supérieur ou égal à 10 µ sont totalement arrêtées au niveau du naso-pharynx, en règle générale pour les particules de diamètre inférieur à 10 µ la pénétration augmente lorsque le diamètre diminue, une partie très fines particules est rejetée lors de l'expiration.

II-16. CONCLUSION

Depuis la naissance de la pollution de poussière, elle se forme une dangerosité menace essentiellement la santé des travailleurs exerçant de leur profession habituelle, par l'exposition directe ou indirecte aux produits poussiéreux, les habitats et la santé de l'air atmosphérique.

Afin de limiter l'émission des poussières on met les dispositifs de dépoussiérage et de captage de poussière, ce qu'on va expliquer dans le prochain chapitre.

CHAPITRE III : NOTIONS SUR L'ASPIRATION DE POUSSIÈRES

III-1. INTRODUCTION

Pour vivre, l'organisme de l'être humain consomme en moyenne 15kg d'air par jour qu'il puise du milieu ambiant. Alors que le milieu professionnel dans les locaux de transformation de céréales est fortement pollué par les poussières (poussière de farine et de grains de blé).

De ce fait l'opération d'assainissement de cette atmosphère polluée demeure impérative voire indispensable d'éliminer ces particules en suspension pas le procédé de ventilation.

L'aspiration joue un rôle très important au cours de la mouture. Outre l'aspiration des sasseurs nécessaire par définition, une aspiration est installée sur les machines à cylindre et les moyens de blutage (plachisters) et d'autres installations.

Le rôle de l'aspiration est multiple :

- Elle a tout d'abord pour objet de tendre vers l'équilibre entre l'atmosphère (température et état hygrométrique) qui règne à l'intérieur des machines et des conduits et celle régnant à l'intérieur du bâtiment lui-même, dans le but de refroidir et l'atmosphère interne, afin de faciliter le travail des machines;

- Deux autres conséquences diverses découlent de l'aspiration:

- La séparation des produits très légers au cours de la mouture, faire pellicules de son ou « folles » farines;

- Le séchage des produits durant le travail dont les effets constituent la plus grande partie des pertes de mouture.

Par ailleurs, par la légère dépression qu'elle provoque à l'intérieur des machines, l'aspiration empêche les produits fins comme la farine de s'envoler à l'intérieur des machines, ce qui contribue à améliorer l'hygiène du milieu et à faciliter l'entretien du moulin.

Un filtre à air sépare les produits emportés par l'aspiration.

Les produits récupérés, sont réintroduits dans le circuit à un endroit approprié du diagramme (ça ne concerne que la poussière de farine).

Un cyclone récupère les poussières détachées par les grains de blé qui seront par la suite conditionnées dans des sacs et seront utilisées pour l'alimentation du bétail.[13]

III-2. GENERALITES SUR L'EXPOSITION AUX POUSSIÈRES

Dans de nombreux secteurs, l'activité professionnelle est source d'exposition à des poussières dont les effets sur la santé peuvent être variés selon le type de poussières et d'exposition : Irritation respiratoire, allergie, fibrose pulmonaire, cancer...

La ventilation et l'aspiration à la source sont les piliers d'une prévention efficace.

En milieu professionnel, des expositions supplémentaires sont susceptibles de se produire. Qu'elles soient dues à du concassage, de la manipulation de poudres, de l'usinage ou à toute autre activité impliquant des frottements entre matériaux, les poussières rencontrées sur les lieux de travail sont des types: minérales (calcaire, silice, verre, amiante...), métal solides dans l'air, formées par un procédé mécanique ou par leur remise en suspension depuis des lieux de dépôt. Organiques (bois, farine, coton, cuir, déjections de volailles...). Naturelles (pollens, éruptions volcaniques, érosion des roches...) ou résultant d'une activité humaine (particules diesel, usure des pneus, rejets industriels, production agricole...), elles sont partout dans l'air ambiant et nous en inhalons en permanence.

La poussière de farine est considérée comme un agent sensibilisateur potentiel et peut entraîner une allergie à la farine de blé chez des travailleurs qui y sont exposés.

Les installations de captage et de filtration des poussières sont utilisées aussi bien au jour qu'au fond. La différence essentielle entre ces deux utilisations est que, dans le premier cas, l'air résiduel, après passage dans l'installation, peut, sans danger, être évacué dans l'atmosphère extérieure, alors que, dans la plupart des utilisations au fond, l'air filtré continue de passer au travers des chantiers et ainsi risque d'être inhalé par les travailleurs.

Aussi faut-il, dans ce dernier cas, que le filtrage soit plus efficace et que les particules les plus fines soient retenues. Au jour, en revanche, le matériel de captage des poussières est souvent plus complexe, en raison des nombreux types de machines qui peuvent dégager des poussières et de la multitude des endroits où ces dégagements peuvent se produire. Pour lutter efficacement contre les poussières, il faut installer un réseau de canalisations extrêmement complexe, monter divers types de hottes, prévoir et diriger les moindres déplacements de l'air.

III-3. DEPOUSSIÉRAGE

Il s'agit de décrire le dispositif d'aspiration et de filtration de poussières; les procédés industriels peuvent donner lieu à la production de poussières. On peut notamment citer : Le travail mécanique du bois et des métaux, l'industrie du papier et du carton, *l'industrie agro-alimentaire* mettant en œuvre des pulvérulents la pétrochimie et la plasturgie (fabriquant et mettant en œuvre des granulés plastiques) etc. On trouve donc dans ces entreprises des systèmes de récupération de poussières.

Les quantités de poussières déposées dans les structures d'un silo, peuvent être sensiblement réduites par la mise en place de points de captage de poussières par aspiration (dépoussiérage) aux endroits où les productions sont les plus importantes.

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 :

1- Une captation des poussières par aspiration par del'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.

2- Un transport de l'airempoussiéré.

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.

3- Une séparation des poussières de l'air.

Le choix d'une technique de dépoussiérage adaptée et efficace dépend de différents facteurs.

Avant de faire le choix d'une technique de dépoussiérage, il est essentiel de bien connaître :

- Les caractéristiques des poussières (composition granulométrique, masse volumique, forme et surface spécifique, composition chimique, résistivité, vitesse de chute);
- Les caractéristiques des gaz à traiter (débit, température, composition chimique, point de roséacide).

Le traitement des émissions de poussières présente souvent un double intérêt :

- Il protège le personnel par un assainissement des lieux de travail, ou limite les impacts sur l'environnement par une épuration des gaz rejetés dans l'atmosphère;
- Il récupère, sous certaines conditions, des poussières qui peuvent présenter une valeur marchande et être valorisées par réutilisation ou par recyclage.

Le traitement peut se faire en utilisant différents matériels :

- Les cyclones;
- Les laveurs Venturi;
- Les dépoussiéreurs à médiafiltrants;
- Les électro-filtres.

La réduction des émissions liées aux activités agricoles implique aussi la mise en œuvre de techniques et de pratiques spécifiques (la couverture des sols nus ou la réduction du labour, par exemple).

III-4. CAPTAGE

III-4-1. DEFINITION ET PRINCIPE

Le captage des poussières consiste en principe à isoler la source d'empoussièrement et à y aspirer l'air constamment. Si l'on veut que le volume d'air traité n'atteigne pas des proportions excessives, il faudra donc réduire au minimum le nombre et l'importance des ouvertures par lesquelles peut passer l'air. Néanmoins, la quantité d'air à aspirer dépend également de divers autres facteurs, notamment de la nature de l'opération génératrice de poussières, de la quantité de poussières dégagée et des conditions de ventilation.

III-4-2. CAPTATION DE LA SOURCE DE POUSSIÈRES

Dans leur majorité, la granulométrie des poussières des produits d'origine agro- alimentaire est comprise entre 1 et 60 microns. Leur captation ne pose généralement pas de problème de métallisation et de pollution de l'atmosphère, si elle est effectuée à la source et dans les règles de l'art.

En effet, les grosses et les fines particules n'ont pas la même inertie.

On constate généralement que pour des particules d'un diamètre inférieur à 50 microns, la vitesse de chute est faible et du même ordre de grandeur que celle des courants d'air ambiant d'une salle. Même projetées à grande vitesse à la sortie d'une goulotte par exemple, ces particules seront arrêtées sur les faibles distances. Elles seront donc faciles à capter car elles suivent les courants d'air.

Leur captation pourra être faite en négligeant les paramètres concernant la poussière et en ne donnant que les caractéristiques d'écoulement de l'air devant les hottes d'aspiration.

Par contre, les grosses particules auront une trajectoire différente. Il convient donc d'adapter les hottes et les dispositifs de captation à la nature et à la composition granulométrique de la poussière.

Les tableaux 1 et 2, ci-dessous donnent pour quelques particules la vitesse de chute et la distance horizontale parcourue en cas de projection.

Tableau III.1.A: Distance parcourue en fonction de la vitesse de chute

D	5	10	20	50	100	microns
Vitesse de chute V1	1,5	6,0	24	140	470	Mm/sec
Temps nécessaire pour atteindre 0,95 V1	0,46	1,8	7,3	43	143	milli sec
Distance parcourue	0,5	7,5	120	4100	4600	microns

Distance horizontale parcourue par une particule sphérique de 2g/cm^3 de masse volumique, lancée horizontalement, avant d'atteindre une vitesse de 250 mm/sec (les effets de la pesanteur ont été négligés).[13]

Tableau III.1.B : Distance parcourue en fonction de la vitesse de chute

Diamètre-microns	5	10	20	50	100
Vitesse initiale m/sec	Distance parcourue en mm				
	20	109	217	534	1085
	10	91	183	365	913
	5	74	148	296	740

Les particules de poussières agro-alimentaires, généralement fines, se déplacent donc sous l'action d'un courant d'air, et leur captation consiste donc à diriger les courants d'air vers la hotte.

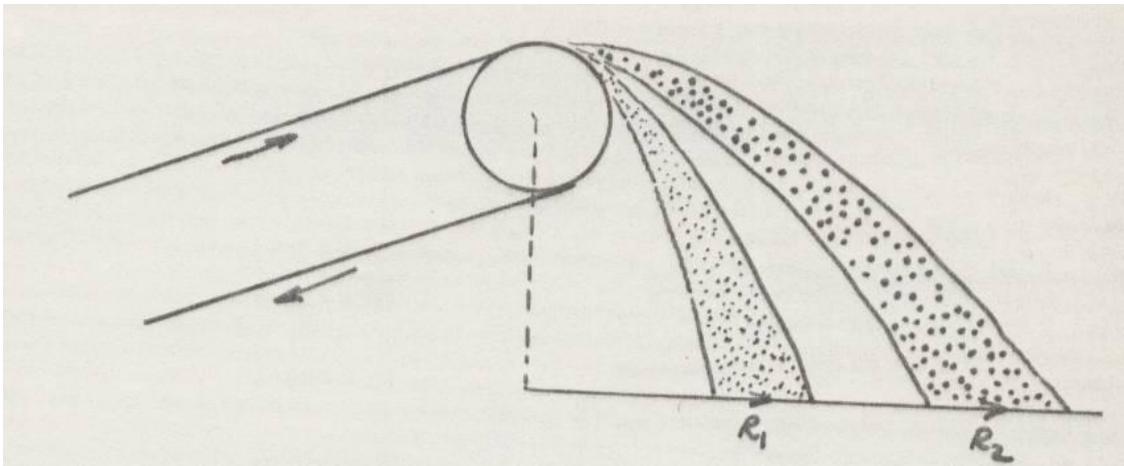
Il faut prendre en compte également les sources d'air secondaires et principalement les courants d'air ambiant et les courants de convection.

Ce sont en fait eux qui conditionnent le débit d'air à mettre en jeu la captation.

Il convient de limiter les courants d'air dans les locaux où se réalisent la captation et de concevoir des hottes aussi enveloppantes que possible.

Enfin, en pratique, certains dispositifs réalisent une ségrégation initiale des poussières en fonction de leur granulométrie et perturbent les lois des phénomènes connus d'un mélange homogène.

Tel est le cas de certaines bandes transporteuses non capotées.

**Figure III.1 :** Bande transporteur

Les particules les plus grosses sont en contact avec la bande et donc projetées. Les fines particules sont freinées plus rapidement et tombent plus vite. Les orifices d'aspiration du dépoussiérage doivent récupérer la fine poussière et donc se trouver également sous la bande.

Si la captation à la source agit en dirigeant les mouvements de l'air contaminé, on doit cependant faire remarquer que :

- La vitesse de l'air aspiré dans la hotte diminue très rapidement au fur et à mesure que l'on s'éloigne du plan d'aspiration. [13]

Tableau III. 2 : Exemples types de Condition de disposition du contaminant en rapport de la Vitesse de captage née

Condition de disposition du Contaminant	Exemples types	Vitesse de captage née
Contaminant émis sans vitesse dans un air calme	Évaporation de liquides contenus dans des bacs - dégraissage etc	0.25 à 0.5 m /s
Faible vitesse dans un air en mouvement léger	Cabine de peinture - remplissage intermittent de récipients - chute de transporteur à bande à vitesse lente -soudure, etc	0.5 à 1 m /s
Forte quantité de contaminations émies dans une zone d'air en mouvement rapide	Peinture au pistolet dans des cabines de petites dimensions - remplissage intensif de récipients - chute de transporteur à bande à grandes vitesses - broyeur etc	1 à 2.5 m /s
À grande vitesse dans une zone d'air à mouvement très rapide	Meulage-sablage-décochage etc	5 à 10 m /s

Ces chiffres peuvent être réduits lorsque l'on a des hottes de grandes démentions. Ils sont augmentés de 20% lorsque l'on a des poussières toxiques.

Le débit d'air à mettre en jeu sera fonction de la dimension et de la nature de l'équipement ou du site à dépoussiérer.

L'efficacité de la captation réside dans l'optimisation de la vitesse et du débit de captation.

III-4-3. BUSES DE CAPTAGE

Elles captent les poussières au plus proche de leur émission En général, les systèmes de capture de la poussière en suspension dans l'air impliquent aussi la vaporisation d'eau. Lorsque les particules de poussière heurtent les gouttelettes d'eau, elles deviennent trop lourdes pour rester dans l'air et se déposent.[36]

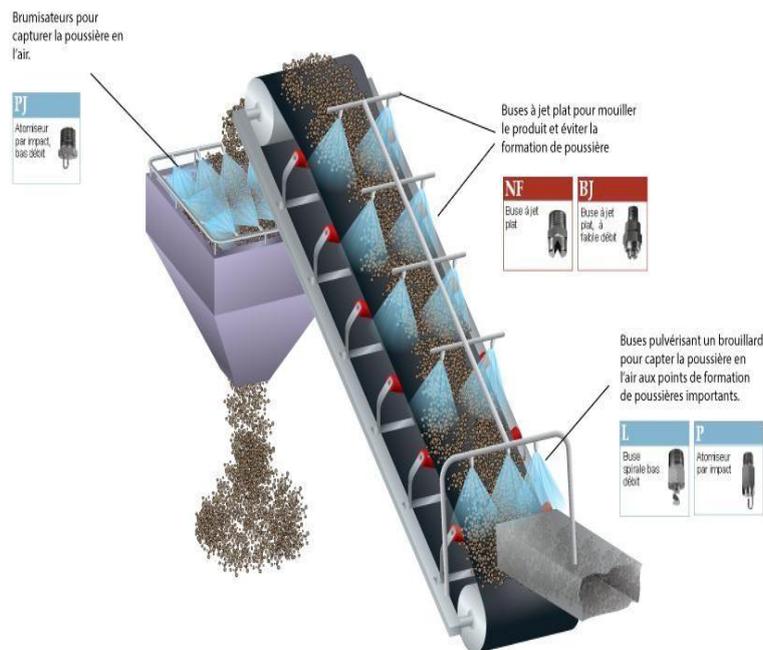


Figure III.2 : Buse pour traitement des poussières

III-5. RESEAUX D'ASPIRATION D'AIR POUSSIEREUX

Le réseau d'aspiration plus ou moins ramifié assure la liaison entre les dispositifs de captation et de dépoussiéreur d'une part, et entre le dépoussiéreur et l'atmosphère d'autre part.

Son importance est capitale du fait de la puissance de l'installation qu'il absorbe et du rôle qu'il joue dans la propagation d'une explosion. Toute erreur dans sa conception peut remettre en cause l'efficacité de la captation.

Sa conception et son implantation sont soumises à quatre facteurs limitant :

- 1- La position des points d'aspiration et du dépoussiéreur;
- 2- Le bon dimensionnement des tuyauteries et le respect des vitesses de transport;
- 3- La configuration du bâtiment et l'équilibrage du réseau;
- 4- L'hiérarchisation des risques d'explosion et le degré de protection qu'ils requièrent.

Il importe de réaliser un circuit aussi court et aussi symétrique que possible.

Le dimensionnement des gaines ne dépend pas uniquement du débit d'air mais aussi de sa vitesse.

Il faut donc éviter :

- Le bouchage d'une tuyauterie par suite d'une vitesse trop faible.
- L'usure des tuyauteries par abrasion.

On utilise, suivant la granulométrie et la nature des poussières, des vitesses comprises entre 16 et 25 m/s. Cette vitesse doit être impérativement maintenue dans toutes les portions du circuit.

Dans la conception des gains (choix des diamètres, des raccords) il convient de respecter les règles simples d'aérodynamisme.

III-6. TRANSPORT DE L'AIR EMPOUSSIERE

Dans cette étape on distingue deux dispositifs :

III-6-1. GAINES D'ASPIRATION

Elles servent à transporter les poussières captées.



Figure III.3: Gaine d'aspiration.

III-6-2. CAPOTS

III-6-2-1. DEFINITION :

Le capot désigne l'entrée du réseau de gaine et la bouche d'aspiration. Il est déterminé de façon à profiter de la trajectoire naturelle des poussières (et notamment de leurs force ascensionnelle), pour mieux les canaliser et surtout éviter toute conception decapotage, fondée sur un entraînement à contre-courant qui se révèle toujours d'une moindre efficacité pour une dépense énergétique supérieure.[37]

Le capotage limite la dispersion des poussières.

III-6-2-2. CONCEPTION DU CAPOTAGE

Le capotage doit être déterminé en fonction du procédé et du mode de génération des polluants. Il est conseillé, si cela est possible, de profiter de la trajectoire naturelle des gaz ou des poussières (et notamment de la force ascensionnelle des fumées, s'il y a lieu), pour mieux les canaliser et surtout éviter toute conception de capotage, fondée sur un entraînement à "contre-courant" qui se révèle toujours d'une moindre efficacité pour une dépense énergétique supérieure.

III-6-2-3. COEFFICIENT DE CONTRACTION OU PERTE DE CHARGE DU CAPOTAGE

Bien que peu souvent rappelé ce coefficient donne une approche particulière sur le capotage. C'est la connaissance de cette donnée qui permettra souvent de réaliser un bon capot d'aspiration n'ayant pas trop de pertes de charges.

Outre la création de la perte de charge dynamique, la forme du capot d'entrée détermine une perte de charge plus ou moins importante, suivant le comportement qui s'ensuit des filets d'air à l'entrée.

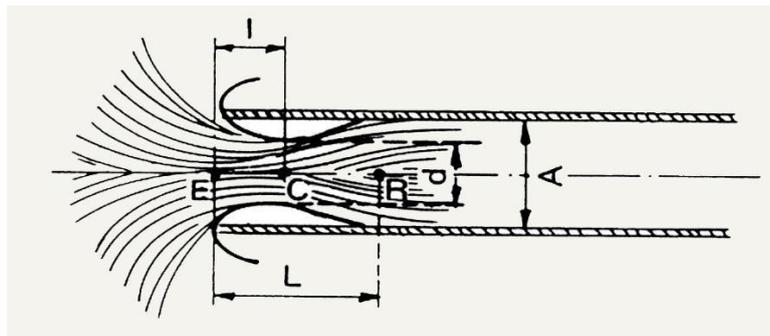


Figure III.4 : *Contraction de la veine d'air à l'entrée d'un système*

La figure (III.4) ci-dessus représente schématiquement le trajet suivi par les filets d'air à l'entrée d'un système d'aspiration, celui-ci, en l'occurrence, étant un simple tuyau cylindrique de diamètre A. le contour de la masse d'air pénétrant dans le système n'épouse pas tout de suite la paroi cylindrique du tuyau, mais seulement après avoir parcouru une certaine distance L depuis l'entrée. La veine d'air présente son diamètre minimum d à une distance l de l'entrée. On démontre en aéraulique que la perte de charge occasionnée par la contraction de la masse d'air du point E au point C, puis du point C au point R, est fonction de l'ampleur de ces deux

phénomènes successifs.

La perte de charge est d'autant plus élevée que le rapport d/A est faible. Ce rapport est appelé coefficient de contraction et il est caractéristique du modèle et de la disposition de la bouche d'entrée.

L'utilisation d'un flasque d'entrée, d'un plan de travail, d'une entrée conique, seront des éléments modérateurs du coefficient de contraction.

Lorsqu'un capot est posé sur une table de machine, capot de toupie par exemple, il ne se produit aucune contraction du côté où le capot repose sur la table.

Le coefficient de contraction de l'orifice se trouve donc modifié par rapport au précédent. La relation liant le nouveau coefficient à l'ancien est :

$$C_{\text{nouveau}} = C_{\text{primitif}} \left(1 + 0,12 \frac{L}{P}\right) \quad (\text{IV.1})$$

L = Longueur du côté sur lequel la contraction est supprimée
 P = Périmètre de l'orifice

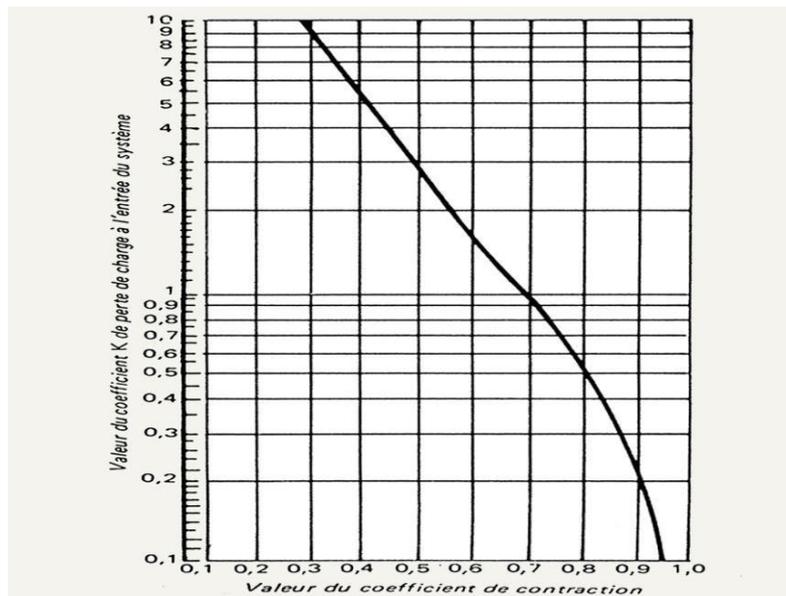


Figure III.5 : Relation entre le coefficient de contraction et le coefficient K de perte de charge à l'entrée d'un système

III-7. CARACTERISTIQUES DES TECHNIQUES DE SEPARATION AIR / POUSSIERE

III-7-1. CAS DES FILTRES A MANCHES UTILISE DANS LE SECTEUR AGRO-ALIMENTAIRE [1]

Le filtre à manches appartient au groupe des séparateurs aujourd'hui utilisés le plus souvent pour le dépoussiérage dans tous les processus technologiques de l'exploitation minière, de la métallurgie, de l'industrie de ciment, de bois, de papier, des produits pharmaceutiques, de l'amiante, des installations thermo-énergétiques etc. [38]

Ce filtre est utilisé au moment de la nécessité d'une haute efficacité du dépoussiérage

suite à l'élimination des particules allant de la taille submicronique jusqu'à celle de plusieurs centaines microns en diamètre avec l'efficacité de 99,99%. La gamme habituelle de température à laquelle le filtre à manches est utilisé va jusqu'à 260°C et les valeurs de perte de la pression 1200 ÷ 5000 Pa.[39]

Les filtres à manches feutre que l'on trouve sur les installations sont en général du type à dé-colmatage pneumatique. Un injecteur envoie de courtes impulsions d'air comprimé à 4 ou 6 bar dans les manches. L'air aspiré traverse une toile qui retient les poussières et laisse passer l'air. Une injection d'air comprimé à travers le média filtrant permet d'éviter le colmatage de celui-ci et de faire tomber les poussières vers une capacité destockage.

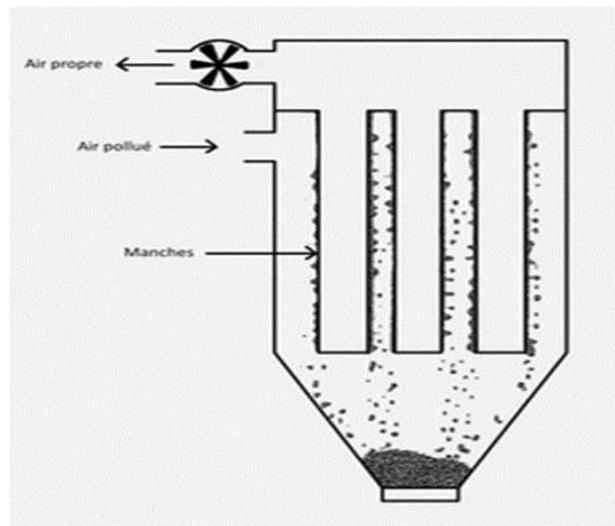


Figure III.6 : Représentation Schématique du Filtre à Manches

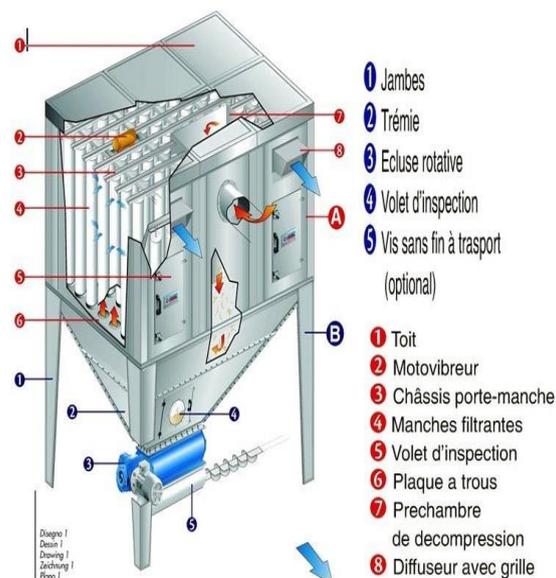


Figure III.7 : Autre représentation Schématique du Filtre à Manches

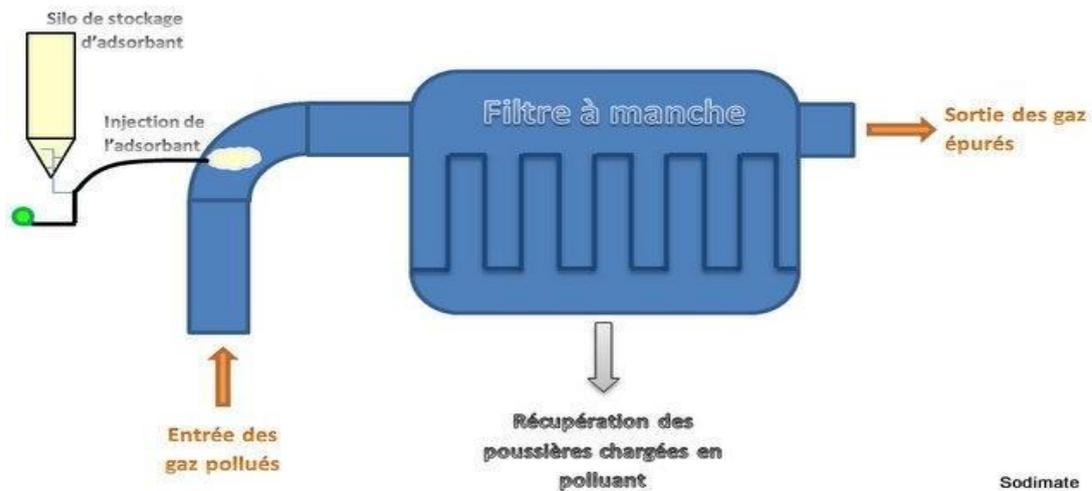


Figure III.8 : Filtre à manche

❖ PRINCIPE

Le filtre à manche est constitué d'un caisson fermé à sa base par une trémie, dans lequel sont suspendues des manches filtrantes en feutre ou en tissu ouvertes à une extrémité. Les gaz chargés de poussières pénètrent dans la partie basse du caisson et rencontrent un déflecteur qui permet dans un premier temps de séparer les grosses particules de poussières. Ils traversent ensuite les manches de l'extérieur vers l'intérieur. Les poussières sont alors retenues sur la surface extérieure des manches sous forme de couche, appelée « gâteau de filtration ».

Le principe de base est la séparation à travers une couche filtrante poreuse.

❖ EFFICACITE

Recommandé pour les captations de poussières fines (rendement très élevé) ainsi que pour la captation des polluants gazeux (injection d'adsorbants).

❖ CARACTERISTIQUES

Les caractéristiques sont :

- Dispositif le mieux adapté aux fines poussières grâce à l'effet «gâteau»
- Possibilité de capter les polluants gazeux par injection de réactifs en amont du

filtre.

Remarque : Équipement multifonctions

❖ INCONVENIENTS

Les inconvénients sont :

- Manches fragiles et parfois chères;
- Média filtrants classiques non résistants aux températures élevées (au-delà de

250°C) ;

Pertes de charge plus importantes que dans un électro-filtre;

- Frais d'entretien élevés dus à la présence de pièces d'usure;
- Risques d'inflammation et d'explosion dans le cas de poussières combustibles;
- Quelques manches percées peuvent remettre en cause les performances du filtre;
- Maintenance et surveillance contraignantes.

❖ SECTEURS D'ACTIVITE

Les secteurs d'activité sont :

- Cimenteries
- Chimie
- Sidérurgie
- Incinération des ordures ménagères
- Métallurgie des métaux non ferreux
- **Industrie agro-alimentaire**

III-7-2. CYCLONES

Le cyclone de séparation est un dispositif permettant de séparer un gaz des fines particules solides qui y sont mélangées. Il impose au gaz une rotation rapide qui projette les particules sur les côtés du cyclone par force centrifuge. Ces dernières tombent ensuite dans un bac grâce à la force de frottement. Le gaz propre, maintenant libéré d'une partie de sa charge de poussière, s'échappe par le tube de sortie (le gaz ne remonte qu'au moment où le diamètre du cône est égal à celui du tube de sortie). Il forme un second vortex au centre du premier, de sens contraire (voir simulation ci-dessous). Les particules les plus fines ne sont toutefois pas séparées du gaz, leur masse étant trop faible. [40]

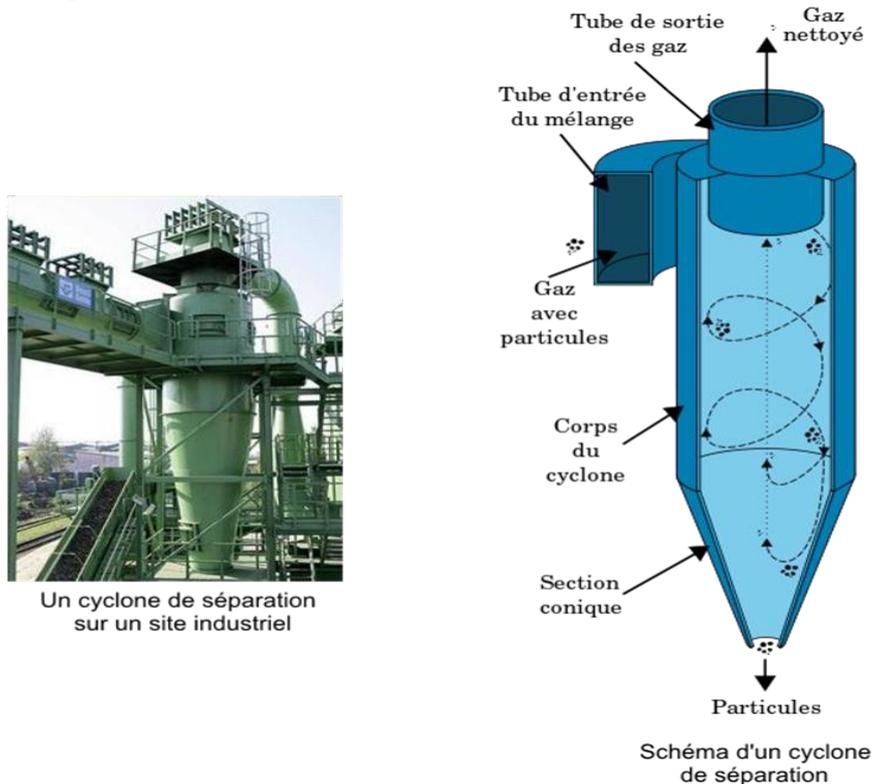


Figure III.9 : Représentation Schématique du Cyclone

❖ PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

Le principe de base : Force centrifuge

Le gaz pollué est soumis à un mouvement de rotation. Sous l'influence de la force centrifuge, les particules sont plaquées sur les parois du cyclone où elles s'agglomèrent et tombent sous l'action de la pesanteur dans la trémie du cyclone. L'air épuré remonte au centre du tourbillon par la cheminée centrale du cyclone.

❖ EFFICACITE

L'efficacité d'autant plus grande que :

- La masse volumique des poussières est plus importante;
- Le diamètre des poussières est plus grand;
- Le diamètre du cyclone est plus petit;
- La perte de charge est importante;
- La concentration en poussière est élevée;
- La viscosité des gaz est faible.

Ps : Ne capte pas les poussières fines (rendement insuffisant) et les polluants gazeux.

❖ CARACTERISTIQUES

Les caractéristiques sont :

- Faible investissement;
- Entretien réduit.

Ps : Très performant en tant que pré-dépoussiéreur

❖ INCONVENIENTS

Les inconvénients sont :

- Peu efficace pour les particules de taille inférieure à 5 μm ;
- Risque de colmatage, de corrosion ou d'abrasions suivant les caractéristiques des poussières.

❖ SECTEURS D'ACTIVITES

- Le secteur d'activités est spécifiquement en Pétrochimie.
- Certaines Minoteries, Semouleries (Agro-alimentaires).
-

III-8. RECUPERATION DE LA POUSSIERE

Quel que soit le principe de filtration retenu celui-ci capte la poussière et la concentre à certains endroits. Le devenir de ces poussières captées doit donc faire l'objet d'une grande

attention puisque leur granulométrie les rend très explosives. Il existe plusieurs types de solution :

- La chambre à poussière : Celle-ci est directement connectée à un cyclone et qui centralise la poussière et est vidée manuellement par un opérateur. Le principe de fonctionnement de la chambre à poussières est repris sur la figureci-dessous.

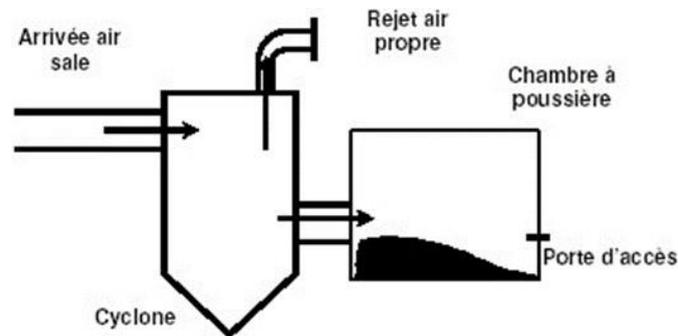


Figure III.10 : Schéma de principe d'une chambre à poussière

- Récupération de la poussière par écoulement gravitaire dans une trémie de stockage située sous le filtre à manche ou le cyclone.

- Réinjection de la poussière dans un circuit parallèle conduisant à un local à poussières dans laquelle elle est stockée. Ce local est préférentiellement situé à l'extérieur, isolé de toute source d'ignition et, si possible, se présenter sous la forme d'une benne directement transportable vers une déchetterie.

- Réinjection de la poussière sous forme de « gâteau » dans le circuit de manutention du grain. Ce système bien que largement répandu disparaît progressivement au profit d'un dépoussiérage centralisé.[41]

III-9. CONCLUSION

Malgré le coût, le captage à la source est de loin le plus efficace en terme de propreté pour éviter l'émission de poussières de farine.

L'aspirateur est un moyen de diminuer significativement le dégagement de poussières. Ces aspirateurs doivent être choisis dans la gamme des équipements professionnels. Ils doivent être équipés:

- De filtres ou média filtrant de catégorie M ou H pour limiter le rejet des poussières aspirées. Ce filtre doit être changé régulièrement selon les préconisations du fabricant, sinon, l'aspirateur rejeterait les poussières les plus fines et donc les plus dangereuses, au bout d'un certain temps d'utilisation;
- D'un système de décolmatage automatique du filtre, cuve fermée sans émission de poussière;
- D'un tuyau et d'un média filtrant antistatiques et résistant à la chaleur en cas de nettoyage des fours;
- D'un sac jetable de récupération de poussières.

Afin d'améliorer le niveau de sécurité, l'utilisation d'un moteur non producteur d'étincelle en fonctionnement normal est préconisé. Cet aspirateur industriel est destiné au nettoyage des surfaces du fournil, en particulier les sols, ainsi que les équipements sur ou dans lesquels se déposent des poussières de farine (diviseuse, table de travail, four...). Rappelons que la poussière de farine peut être à l'origine d'une atmosphère explosive sous certaines conditions (en particulier l'intérieur d'un silo doit être considéré comme une zone à risque d'explosion). Aussi, pour que le fournil ne présente pas de risque d'explosion et pour protéger sa santé contre les risques d'allergie respiratoire, il y a lieu de limiter les émissions de poussières :

- En procédant régulièrement au nettoyage du fournil et de ses équipements, sans provoquer de nuages de poussières qui peuvent se transformer en nuage explosif au contact d'une source de chaleur ou d'une étincelle;
- En mettant en œuvre des procédés générant le moins de poussières possibles;
- En évitant tous les dépôts, couches ou tas de farine.

CHAPITRE IV : IDENTIFICATION DES PRINCIPAUX RISQUES SPECIFIQUES AUX POUSSIÈRES DANS LES MINOTERIES ET SEMOULERIES

IV-1. INTRODUCTION

Les minoteries (ou meuneries) et semouleries sont des établissements industriels qui transforment les grains des céréales, principalement le blé mais aussi le seigle, le maïs..., en farine et en semoule par mouture en écrasant les grains en granulométrie plus ou moins fine (moulin à blé tendre et à blé dur).

Les travaux effectués dans les minoteries et semouleries sont des activités professionnelles qui exposent à de nombreux risques spécifiques, physiques et chimiques...

- Les ateliers de transformation concourant à la production de farine ou de semoule utilisent de nombreuses machines (convoyeurs, broyeurs, ...) dangereuses et bruyantes.
- Le danger potentiel des matières premières ou produits finis est représenté par les poussières de céréales et de farine dégagées au cours de la manipulation ou de la production avec deux conséquences :
 - Générer, à l'intérieur des équipements, des zones à atmosphère explosive, avec risques d'incendie et d'explosion,
 - Les poussières de céréales et de farine sont facilement inhalables et sont responsables d'allergies et de gênes respiratoires chez les minotiers (ou meuniers) et les semouliers.
- Les risques d'incendie peuvent aussi être liés aux produits combustibles stockés, à l'auto-échauffement des stocks de blés dans les silos, ou l'auto-inflammation des farines étuvées.
- Les produits de nettoyage, détergents et désinfectants, très largement utilisés, contiennent des agents chimiques agressifs pour la peau et les muqueuses.
- L'infestation par les insectes implique des traitements par des aérosols insecticides ou des gaz de fumigation toxiques, avec des risques chimiques pour les minotiers et semouliers.

Par ailleurs, il faut prendre en compte les risques professionnels non spécifiques à la minoterie et à la semoulerie, liés aux chutes et glissades de plain-pied, aux manipulations et manutentions manuelles, à la possibilité des contacts avec des conducteurs électriques sous tension, ...

L'évaluation des risques professionnels, l'organisation et l'aménagement de l'environnement du travail, les mesures de prévention collective, le port d'équipements de protection individuelle appropriés et le respect des mesures d'hygiène (tenue agro-alimentaire, ...) et des principes du système HACCP permettent de diminuer les diverses nuisances et de réduire fortement les risques professionnels dans les minoteries et semouleries.

Pour prévenir les risques d'incendie ou d'explosion, il convient notamment de limiter les émissions de poussières de farine et de céréales et les sources d'ignition, par exemple utiliser des équipements spécifiques dans les zones à atmosphère explosive (ATEX), vérifier les installations électriques...

Ces mesures de prévention permettent aussi de participer au respect des exigences croissantes en termes de sécurité sanitaire des aliments.

IV-2. PRINCIPAUX RISQUES DANS LES MINOTERIES ET SEMOULERIES

IV-2-1. INTRODUCTION

Les blés ou autres céréales réceptionnés sont stockés en silos, cellules généralement verticales, en béton ou métalliques, les autres matières premières sont stockées sur palettes.

Le processus de fabrication consiste à éliminer l'enveloppe du grain (le son), et à transformer la partie centrale (l'amande) en particules fines pour composer la farine ou la semoule avec plusieurs grandes étapes : le nettoyage qui élimine toutes les impuretés (poussières, cailloux, pailles...), le mouillage qui permet de séparer plus facilement l'amande des enveloppes et la mouture dans des moulins.

La mouture s'effectue :

- Par broyage entre des cylindres permettant de casser les grains en séparant les enveloppes de l'amande.
- Puis par plusieurs tamisages (blutage) dans un plansichter pour séparer la farine, les semoules, les sons. Les particules plus grosses sont à nouveau moulues.
- Puis parassage pour réduire l'amande du blé en poudre durant des passages successifs séparant la farine des morceaux d'amande trop durs (les refus).
- Puis par claquage/convertissage ou la semoule passe entre des cylindres dont l'écartement va en diminuant pour obtenir de la farine stockée d'abord en vrac en silos.
- Et enfin, une partie des farines en silos, est reprise pour être conditionnée dans des sacs ou paquets et mise sur palettes.
- Certaines farines industrielles sont étuvées pour réduire leur taux d'humidité.
- Les sons sont cubés en "pellets" ou vendus en l'état pour l'alimentation du bétail.
- Le transport des produits entre les différentes étapes est majoritairement effectué par des transporteurs à vis, convoyeurs à chaîne, élévateurs à godets ... pour les grains, par transfert pneumatique ensuite.

Le fonctionnement d'un moulin à blé dur (pour la semoule) est le même qu'un moulin à blé tendre (pour la farine), mais avec un broyage moins fin.

Ces opérations s'effectuent au moyen de différentes machines :

- Le nettoyeur-séparateur, l'épierreux, et l'épointeuse, éventuellement englobés dans une même machine,
- La vis mouilleuse,
- Les broyeurs avec des cylindres cannelés,
- Le plansichter, cabine avec un ensemble de tamis,
- Les sasseurs avec circulation d'air à travers la machine,
- Les claumeurs ou convertisseurs avec des cylindres lisses.

L'installation électrique d'une minoterie doit être dimensionnée pour le fonctionnement de moteurs de puissance élevée et la minoterie doit disposer d'installations importantes de combustion pour le chauffage et l'étuvage.[42]

IV-2-2. ORIGINES DES 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.

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 mesures de prévention et de protection. La procédure d'autorisation administrative peut donner l'occasion de contrôler que les mesures de sécurité prises tiennent compte des accidents possibles.

2. Travaux de maintenance et de réparation

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.

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.

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. La surveillance des appareils impliqués peut accroître le niveau de sécurité si des mesures de prévention adaptées sont prises.

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.

Avec le maïs, la luzerne, les oléagineux (tournesol, soja) et les protéagineux (pois fourragers) ainsi que le lait et le sucre, des feux couverts se sont produits dans les stockages ; il est difficile de lutter contre de tels feux qui impliquent des moyens spécifiques (mise à l'état inerte de cellules par des gaz inertes,...).

L'auto-échauffement et l'auto-inflammation de couches de poussières sur des surfaces chaudes sont aussi connus 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).

Les origines des sources d'inflammation :

a. ***Equipements et installations électriques*** (étincelles, échauffement...) : Les sources d'inflammation dues aux appareils électriques peuvent être suffisamment énergétiques pour enflammer tout type d'atmosphère explosive formée d'un mélange d'air et de poussières, de gaz ou de vapeurs.

b. ***NB*** : La très basse tension, conçue pour la protection des personnes contre les chocs électriques, ne constitue pas une mesure de protection contre l'explosion. Ainsi, des tensions inférieures à 50 V peuvent produire des énergies suffisantes pour enflammer une atmosphère explosive ;

c. ***Electrostatique*** (décharges par étincelles...) : Plusieurs phénomènes électrostatiques peuvent enflammer les atmosphères explosives de gaz, de vapeurs ou de poussières (voir la brochure Phénomènes électrostatiques. Risques associés et prévention, INRS, ED 6354) ;

d. ***Thermique*** (surfaces chaudes, flammes nues, travaux par points chauds, cigarettes...) : une flamme nue constitue une source d'inflammation suffisamment énergétique pour enflammer toute atmosphère explosive. En ce qui concerne les surfaces

e. ***Chaudes*** : la température de la surface doit être comparée à la température minimale d'inflammation en couche et en nuage des poussières ou à la température d'auto-inflammation des gaz et vapeurs ;

f. ***Mécanique*** (étincelles, échauffement...) : les étincelles d'origine mécanique résultent des processus

g. ***Friction***, de ***choc*** et de ***abrasion*** et peuvent enflammer tout type d'atmosphère explosive. Il s'agit, par exemple, de sources d'inflammation susceptibles de

h. Se présenter lors de travaux (meulage) ou résultant

i. Fonctionnement normal ou de dysfonctionnements d'équipements mécaniques (frottement, étincelles d'impact) ;

j. ***Chimique*** (réactions exothermiques, auto-échauffement...) : les feux couvant résultant de l'accumulation de poussières sur des surfaces chaudes ou l'auto-échauffement de stockages de grands volumes sont fréquemment impliqués dans des départs de feu et peuvent

être la cause d'inflammation d'Atex (notamment des Atex formées par l'auto-échauffement de la matière organique) ;

k. **Bactériologique** : La fermentation bactérienne peut échauffer le milieu jusqu'à 70°C environ et le placer dans des conditions d'amorçage d'un auto échauffement ;

l. **Climatique** (foudre, soleil...) : si un impact de foudre se produit dans une atmosphère explosive, l'inflammation va se produire. De plus, il peut constituer une source d'inflammation à distance par effet indirect en induisant des surtensions ou des échauffements dans les équipements ;

Autres : Rayonnements ionisants, ondes électromagnétiques...

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.

6. Types de bâtiments et équipements 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. Ces points doivent être examinés à la construction.

7. Matériels utilisés pour récupérer 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. Les poussières récupérées ne doivent pas demeurer dans l'équipement ou à leur voisinage et doivent être évacuées dès que possible.

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.

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. La formation du personnel est donc à assurer régulièrement.

Le fait de fumer, l'utilisation de baladeuse peut constituer une origine possible d'incendie, voire d'explosion.

IV-2-3. RISQUES LIES AUX MACHINES

Certaines parties des machines utilisées dans les meuneries, notamment lors des opérations de nettoyage et de maintenance, des réglages, des démarrages, sont sources d'accidents majeurs du fait des pièces en mouvement rotatif, en particulier lors des mises en marche intempestives, des arrêts anormaux suite à un bourrage ou à une rupture d'énergie. Les possibilités d'accès aux différentes zones dangereuses des convoyeurs (nettoyage sous le convoyeur, déblocages, déboutrages, ...) génèrent des accidents pouvant être graves, du fait des éléments mobiles ou de la courroie transporteuse.

Il peut en résulter des coupures aux mains, lacérations des avant-bras ou écrasements lors des nettoyages par exemple, ou lors des déplacements des éléments mobiles des machines, entraînement, happement, friction, enroulement des cheveux et des vêtements par des cylindres en rotation, ...

Les sources de bruits dans les meuneries sont nombreuses, créant un environnement bruyant du fait de toutes les machines en fonctionnement. Les niveaux de pression acoustique engendrés par les bruits des machines (sans insonorisation adaptée) peuvent dépasser 100 dB.

En dehors des atteintes au système auditif (déficit auditif, acouphènes...), le bruit ambiant peut entraîner une gêne ou un stress vecteur de troubles du psychisme et de pathologies qui nuisent non seulement à la santé du travailleur mais aussi à la sécurité de son travail par baisse de vigilance et de dextérité ou de concentration.[42]

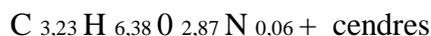
IV-2-4. RISQUES SPECIFIQUES LIES AUX POUSSIÈRES

IV-2-4-1. GENERALITES

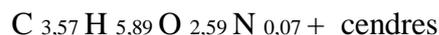
Les céréales constituent un exemple de poussières agro-alimentaires. Ces poussières sont composées par exemple de 65,3 % d'amidon, 6,8 % de fibres (cellulose), 4 % de lipides et 6,5 % de protéine, 9 % d'humidité et 8 % de cendres. Les variations du taux d'humidité et du taux de cendres peuvent être très importantes.

Même si l'amidon, les lipides, les protéines et les fibres ont des compositions chimiques différentes et conduisent à des produits de combustion différents, on peut cependant écrire une formule chimique pour les poussières sèches et humides :

- Pour les poussières humides :



- Pour les poussières sèches :



Pour les substances organiques, un paramètre important influençant les propriétés explosives est la teneur en matières volatiles. Cette caractéristique est mesurée lors du chauffage lent dans des conditions normalisées, de l'échantillon jusqu'à 900°C.

Les matières volatiles sont simplement les gaz émis par la céréale lors de son chauffage

L'équation de combustion complète (ou stœchiométrique) d'un produit composé de carbone (C), d'hydrogène (H), d'oxygène (O), d'azote (N), s'écrit :



Cette caractéristique est importante car l'explosion des poussières agro-alimentaires en mélange avec l'air se produit dans le mélange de matières volatiles formé avec l'air selon le modèle :

Poussières + chaleur → matières volatiles + oxygène de l'air → produits de combustion + chaleur.

D'autres paramètres, comme les taux d'humidité et de cendre influencent les propriétés explosives des poussières agro-alimentaires.

Le taux d'humidité peut être défini comme la perte de masse de l'échantillon entre la température ambiante et 70°C, rapportée à la masse de l'échantillon.

Le taux de cendres correspond au résidu minéral après combustion dans des conditions normalisées de température.

Par ailleurs, au plan de l'incendie, les pouvoirs calorifiques supérieurs des poussières de céréales sont compris entre 15 et 16 MJ par kg.[43]

IV-2-4-2. RISQUES LIÉS AUX STOCKAGES

A première vue, le stockage de produits agro-alimentaires, pourrait apparaître comme ne devant pas poser de risques industriels importants.

Cependant, les informations données par l'accidentologie, montrent clairement que cette branche d'activité peut connaître des accidents industriels graves à la suite d'incendie et d'explosion. Différents aspects des stockages de produits agro-alimentaires concourent à l'origine de ces accidents :

- Les produits manipulés ou stockés contenant du carbone, de l'hydrogène, de l'azote, et de l'oxygène, sont combustibles et par conséquent, sont capables de provoquer des incendies et des explosions et de dégager dans certaines conditions des produits toxiques.
- La manutention des produits agro-alimentaires sous forme de grains, de tourteaux, de pellets crée des quantités de poussières importantes. A titre indicatif, le volume

de poussières engendré par le brassage, le stockage et la circulation de grains est estimé à 0,1% du poids manipulé.

Ces poussières inflammables, lorsqu'elles sont mélangées à l'air dans certaines conditions, forment une atmosphère explosive.

Dans le cas des produits en grains, notamment les céréales, les poussières proviennent principalement du tégument des grains qui se composent de plusieurs couches très minces, friables qui se détachent et se brisent finement lors des diverses manutentions et conditionnement.

Dans certains cas c'est le produit lui-même, à l'état pulvérulent, comme le sucre, qui est à l'origine des poussières :

- Les produits à fortes teneurs en lipides (graines d'oléagineux) peuvent être le siège d'auto-oxydation et donc d'un auto-échauffement, très exothermique pouvant aller jusqu'à l'incandescence, cause possible d'incendie voire d'explosion. Par ailleurs, lorsque les grains sont humides la fermentation peut conduire à une augmentation notable de la température pouvant aller jusqu'à l'incandescence. Ces réactions peuvent s'accompagner ou non de gaz inflammables, cause possible d'incendie et d'explosion.

- La pulvérisation d'additifs combustibles sur les grains pour la conservation (pesticides) ou le soulèvement des poussières (huiles) peut contribuer à augmenter le risque incendie et explosion (formation d'aérosol, grains plus réactifs)

- En dehors des matières agro-alimentaires elles-mêmes, on trouve la présence, dans les matériels et installations, de gasoil, d'huile, de gaz, de bandes de transporteurs, de câbles électriques, de palettes en bois, de sacs papier, de films plastique, ou dans les bâtiments de bois, de PVC, ou pour des activités annexes aux sites, d'engrais, de produits agro-pharmaceutiques qui peuvent participer dans une large mesure, aux incendies en accroissant les effets thermique et toxique, ou en favorisant la propagation dans certains cas de figure et induire un risque d'explosion supplémentaire.

En résumé, les risques inhérents au stockage et à la manutention de produits agro-alimentaires sont de quatre types :

- Risque d'explosion lorsque les produits pulvérulents en suspension ou des gaz inflammables issus de la fermentation anaérobie sont enflammés par une source d'inflammation ;

- Risque d'incendie lorsque la combustion est induite par une source extérieure d'inflammation (étincelle, travail par point chaud, flamme, ...).

- Risque de fermentation aérobie ou anaérobie lorsque les produits stockés (surtout les grains) sont trop humides.

- Risque d'auto-échauffement lorsque les grains ou les poussières sont stockés à des températures trop élevées ou sur des surfaces chaudes.

❖ PARTICULARITES DES PRODUITS

Les stockages des produits agro-alimentaires posent plus ou moins de problèmes de sécurité, selon les spécificités des produits stockés vis-à-vis de l'explosion et de l'incendie.

Les paramètres d'inflammabilité et d'explosivité des poussières dépendent étroitement de leurs caractéristiques (granulométrie, humidité, origine) et peuvent donc varier parfois notablement. [43]

IV-2-4-3. RISQUES D'INCENDIE ET D'EXPLOSION

IV-2-4-3-1. INTRODUCTION

Toutes les poussières combustibles, dont les farines et les sons fins, sont susceptibles d'exploser ou de brûler.

La concentration de poussières doit atteindre un seuil minimum d'explosivité dans un volume restreint et confiné.

A la température ambiante, la plupart des substances combustibles ont une vitesse de réaction avec l'oxygène de l'air très faible et ne conduisent pas à l'incendie ou à l'explosion.

Généralement, le déclenchement de l'incendie ou 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. Des renseignements complémentaires existent dans la norme EN 1127-1.

Les combustibles employés en meunerie pour le chauffage ou les opérations logistiques (gaz naturel ou fioul), la création d'atmosphères explosives par les poussières dues à la manutention des blés, leur broyage et le transport de la farine, les stocks en silos par l'auto-échauffement des blés humides ou l'auto-inflammation des farines étuvées, sont à la source de risques d'incendie et d'explosion.

Les organes mécaniques mobiles des machines et transporteurs peuvent être atteints par les poussières. Les sources d'ignition peuvent être l'intérieur des élévateurs, les surfaces chaudes des moteurs, les paliers des machines, les étincelles créées par les frottements de pièces l'une sur l'autre, notamment avec la présence de corps étrangers (pierres ou morceaux de métal) ou produites par les matériels électriques défaillants,...

L'auto-échauffement est causé par la fermentation aérobie des grains stockés trop humides ou lorsque les grains ou les farines étuvées sont stockés à des températures trop élevées (dépassement de la consigne de température). Les risques de sinistres sont néanmoins beaucoup plus faibles que dans l'industrie céréalière du fait de volumes stockés et de durées de stockage moins importants.

La formation d'un nuage de poussières peut être produite par une fuite d'un appareil mais aussi par la mise en suspension par courant d'air de tas ou de couches de poussières déposés sur le sol et sur les murs du local : l'explosion primaire se produit par l'inflammation de ce nuage mis en contact avec une source de chaleur suffisamment intense, suivie éventuellement d'une explosion secondaire par action de l'onde de pression provenant de l'explosion primaire.

IV-2-4-3-2. RISQUE INCENDIE

IV-2-4-3-2-A. GENERALITES SUR L'INCENDIE

Un **incendie** est une réaction de combustion non maîtrisée dans l'espace et dans le temps. C'est un feu qui peut être violent et destructeur pour les activités humaines et la nature. [44]

La norme X65-020 définit un incendie comme un feu dont on n'a pas ou plus le contrôle. Successivement vont donc être abordé les conditions de démarrage d'un feu et sa propagation, puis les phases de développement d'un incendie.

Le feu est une réaction de combustion qui se développe sans contrôle dans le temps et dans l'espace. Un feu peut se produire si diverses conditions concernant les substances sont remplies et, qu'en même temps, une source d'énergie suffisante, appelée source d'inflammation est présente.

Le système à prendre en considération comprend un combustible, un comburant (généralement l'oxygène de l'air), des gaz inertes (et diverses autres substances) qui peuvent influencer la combustion. Ces substances peuvent dégager ou absorber de la chaleur.

Les conditions de la réaction de combustion sont rassemblées dans le triangle du feu.

Les trois éléments symbolisés par le triangle du feu, doivent être réunis pour qu'un feu se déclenche.

Les processus suivants se produisent au cours du déroulement du feu :

- Changements physiques de la substance (fusion, évaporation, chauffage et séchage) ;
 - Emission des produits de combustion chauds et de rayonnement thermique ;
 - Transformation chimique de la substance (pyrolyse, gazéification) ;
 - Oxydation partielle ou totale du combustible ;
 - Entraînement d'air dans la zone de combustion.

❖ **Trois types de transfert thermique** : (convection, conduction et rayonnement), contribuent à la propagation d'un feu :

- Le **rayonnement** : Il s'agit d'un transfert énergétique sous forme d'ondes infrarouge notamment ;
- La **convection** : Elle permet les échanges de chaleur par brassage de l'air ; ce phénomène est également à l'origine de l'alimentation permanente en oxygène;

• La **conduction** : L'énergie calorifique se propage au sein d'un solide ou par contact entre deux solides. La quantité transférée dépend du temps de contact, du gradient de température, de la surface de contact et de la conductivité thermique.

Trois phases principales peuvent être distinguées dans l'évolution d'un incendie :

• **Allumage ou inflammation** : L'étendue du feu dépend alors de la charge à brûler, du volume, de la forme ainsi que des phénomènes de surface. Si l'on veut éviter une destruction, c'est lors de cette phase qu'il faut agir. C'est une phase de chauffage où la température reste basse (< 300°C),

• **Embrassement généralisé ou combustion vive** : Le feu est alors contrôlé par l'apport de comburant, c'est-à-dire l'oxygène de l'air. La destruction des bâtiments se produit dans cette phase, les pompiers doivent surtout limiter l'extension de l'incendie. La température monte de 300-500°C à 1 000°C en quelques minutes, les risques d'effondrement sont donc importants,

• **Refroidissement** : Ce dernier est global, mais l'échauffement des éléments de construction est encore possible et les risques d'effondrement persistent (phénomènes de dilatation ou de contraction).

La durée des phases et les températures atteintes dépendent des propriétés du combustible, de sa répartition dans la flamme de l'incendie et des conditions ambiantes telles que l'apport d'air.

Il faut souvent un certain temps (période d'induction) pour obtenir l'incendie. C'est pendant cette période d'induction qu'il est possible de détecter précocement l'incendie par des détecteurs de fumées ou de gaz formés.

L'évolution d'un incendie est donc difficile à prévoir, et nécessite une analyse pour chaque cas particulier. Cette analyse doit prendre en compte également la configuration des installations qui peut favoriser la propagation de l'incendie dans un site industriel.

Les combustibles peuvent être naturels ou fabriqués, mais le terme combustible ne correspond pas à une classification chimique.

❖ *Les conditions nécessaires :*

1- Les combustibles

Dans l'industrie agro-alimentaire, les incendies peuvent concerner les matières premières ou les produits dans / ou constituant les bâtiments.

Les combustibles peuvent être soit des solides (produits agro-alimentaires, bois...), des liquides (huiles, gasoil, pesticides, ...), des gaz (gaz de soudage, de chauffage, ...).

Pour qu'une combustion de gaz puisse avoir lieu, il faut que le mélange gaz-comburant soit dans des proportions adéquates (compris entre la limite inférieure d'inflammabilité (LII) et la limite supérieure d'inflammabilité (LSI) pour les mélanges gaz-air).

Lorsque la combustion présente les caractères de l'explosion, on parlera de limites inférieures et supérieures d'explosivité (LIE et LSE).

Un liquide inflammable est un liquide dont les vapeurs dans certaines conditions sont inflammables. Pour chaque liquide, cette condition correspond à la température à partir de laquelle les vapeurs peuvent être enflammées par une source d'énergie (point éclair).

La combustion des solides ne répond pas à des lois aussi précises que celles des gaz ou des liquides.

Les matériaux tels que le bois et autres matériaux cellulosiques émettent des gaz inflammables et le processus de combustion se rapproche de celui des liquides.

❖ *Comburant*

Dans l'agriculture et les industries alimentaires, on ne rencontre généralement que l'oxygène dans l'air.

L'inflammabilité, la vitesse de combustion, la température obtenue au cours de l'incendie et toutes les autres caractéristiques de sécurité liées à l'incendie dépendent fortement de la concentration en oxygène. Généralement, ces caractéristiques sont mesurées à la concentration de l'oxygène dans l'air (20,94 % en volume).

Ces caractéristiques varient de manière importante à d'autres concentrations. Lorsqu'on réduit la teneur en oxygène, il est possible d'arrêter la combustion. Beaucoup de combustibles condensés ne peuvent plus brûler en-dessous de 17 % d'oxygène en volume d'air. Pour les atmosphères explosives dans l'air, il faut abaisser nettement plus la concentration (pour l'hydrogène, il faut descendre à 5 % en volume). Par ailleurs, un feu couvant ou une incandescence avec combustion, peut aussi se poursuivre avec des teneurs en oxygène de l'ordre de 5 %.

❖ *Sources d'inflammation*

Pour l'incendie, on retrouve les mêmes sources d'inflammation que pour l'explosion qui sont décrites dans la cinquième partie du guide (causes des incendies et des explosions).

❖ *Caractéristiques d'inflammabilité*

Les caractéristiques de sécurité incendie permettent l'appréciation quantitative des combustibles en ce qui concerne le phénomène dangereux d'un incendie.

Les caractéristiques les plus importantes concernant la sécurité incendie sont :

• **Combustibilité** : Elle caractérise la capacité de combustibles à réagir avec un comburant (principalement l'oxygène de l'air) avec développement de chaleur et de lumière.

Pour les produits granulaires, on peut notamment utiliser des méthodes permettant de caractériser la propagation de la combustion dans un tas de dimensions données, enflammé par une source d'inflammation comme celle de la norme VDI 2263.

Pour les liquides inflammables, il est important de connaître la vitesse de régression de la surface de la nappe de liquide ce qui permettra de déterminer l'importance de la puissance calorifique produite. Des modèles permettent de déterminer ces grandeurs.

Dans tous ces cas, il est indispensable de connaître les puissances calorifiques de feux pleinement développés.

• **Point d'éclair** : C'est la plus faible température à laquelle il faut porter un liquide pour qu'une quantité suffisante de vapeurs soit émise par un liquide dans des conditions spécifiées d'essais pour obtenir une inflammation lorsqu'on applique une source d'inflammation.

Le point d'éclair n'est valable que pour les liquides inflammables (hydrocarbures, solvants organiques).

• **Température d'auto-inflammation** : C'est la température minimale à laquelle l'allumage est obtenu, par chauffage dans des conditions d'essais spécifiques, et en l'absence de toute source d'allumage auxiliaire.

Ce qui concerne les poussières, il faut faire la différence entre les températures d'inflammation des couches et des nuages de poussières. Les méthodes décrites ci-après ont été normalisées par la CEI.

Le test de référence pour déterminer la **température d'inflammation d'une couche de poussières** est le test réalisé avec une couche de 5 mm d'épaisseur placé sur une plaque chauffée. A titre indicatif pour les produits agro-alimentaires pour des couches de 5 mm les températures sont comprises entre 200 et 400°C. Généralement en France, l'INERIS préfère déterminer la température d'apparition des phénomènes exothermiques dans un essai d'analyse thermique différentielle (ATD) (voir température d'auto-échauffement).

A titre indicatif, pour les produits agro-alimentaires, les températures d'inflammation des nuages sont comprises entre 350 et 500°C.

• **Chaleur de combustion, potentiel calorifique** : C'est l'énergie calorifique susceptible d'être dégagée par la combustion complète d'un matériau par unité de masse. Cette énergie est appelée Pouvoir Calorifique Supérieur « PCS », si on considère l'eau condensée et pouvoir calorifique inférieur lorsque l'eau est à l'état de vapeur.

❖ **Propagation d'un incendie**

La dynamique de la propagation d'un incendie peut être illustrée par ce qui est obtenu lors de l'incendie de certaines courroies transporteurs.

Les transporteurs à bande sont très utilisés pour la manutention et le transport de produits en vrac, tant sur de courtes que de longues distances.

Les bandes sont généralement constituées d'une carcasse (textile ou métallique), et de matériaux élastomériques ou thermoplastiques (polypropylène, polybutadiène, isoprène, chloroprène, PVC, ...). Leur pouvoir calorifique est élevé (40 mJ/kg pour certaines courroies facilement inflammables et propagatrices de la flamme, celui du bois étant de l'ordre de 18 mJ/kg).

❖ **Conséquences d'un incendie**

Les Conséquences d'un incendie sont :

• **Effets thermiques :**

Les flux thermiques dégagés par la combustion de matières peuvent engendrer à la fois :

- Des brûlures "graves" pour les personnes,
- Des effets sur les structures pouvant conduire à l'effondrement de constructions.

Le tableau 9 donne des indications sur les intensités des flux thermiques et les conséquences possibles.

• **Effets sur l'homme**

L'effet sur l'homme du flux thermique dégagé par un incendie est surtout lié à la durée du temps d'exposition.

A titre indicatif, les courbes du flux minimal léthal et du flux correspondant aux blessures sérieuses données à la figure 20 montrent qu'elles sont, en fonction du temps d'exposition (s), les intensités du flux rayonné (kW/m²) nécessaires.

Des seuils caractéristiques des flux thermiques de plusieurs minutes, respectivement de 5 kW/m² pour l'apparition de la létalité et de 3 kW/m² pour la limite des effets significatifs sont retenus dans le cadre des études de dangers.

IV-2-4-3-3. RISQUE D'EXPLOSION DES POUSSIÈRES

IV-2-4-3-3-A. DEFINITION DE POUSSIÈRE

« 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. »[45]

« 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. » [46]

IV-2-4-3-3-B. PARAMETRES LIES AUX POUSSIÈRES ET AUX PROCESS

Plusieurs paramètres liés aux poussières et aux process sont déterminants pour l'explosion :

1. Caractéristiques des poussières

Pour qu'une explosion de poussières soit possible, il faut que le produit pulvérulent combustible soit à l'état suffisamment divisé (au moins une partie des particules de dimensions inférieures à 0,5 mm). Des essais de laboratoire ont montré que les particules plus grosses que 0,425 mm ne contribuent pas à la pression produite dans l'appareil où est réalisée

l'explosion. Généralement les particules de taille inférieure à 0,075 mm participent complètement à l'explosion.

Par ailleurs l'humidité et la composition chimique des poussières (cendres, matières volatiles) ont une incidence sur la violence de l'explosion.

2. Formation du nuage

Un nuage de poussières peut être créé par le processus même de traitement du produit, broyage, séchage en lit fluidisé, par exemple. Il peut l'être aussi par les manutentions qu'il subit : vidange de silos, transport pneumatique, dé-colmatage de filtres, etc. D'expérience, au bout d'une heure la majorité des poussières se sont redéposées. Il peut aussi être créé par le démarrage de l'explosion elle-même.

La dispersibilité des poussières est difficile à caractériser. Elle est en principe d'autant plus grande que la densité de la poussière est faible. Elle dépend aussi de sa cohésion, celle-ci dépendant de l'humidité et de la forme des particules.

Les poussières fines restent le plus longtemps en suspension : il y a donc là une raison supplémentaire pour qu'elles soient les plus dangereuses.

3. Turbulences

Ce sont les fluctuations aléatoires des propriétés d'un fluide (vitesse, température, densité, concentration, etc.) associées à l'existence de tourbillons.

Dans les processus industriels, toute une gamme de conditions de turbulence peut être rencontrée entre les deux conditions extrêmes suivantes : faible turbulence lors du remplissage de silos par alimentation gravitaire et très forte turbulence lors de certaines opérations de broyage.

La turbulence accroît les transferts de chaleur par convection et l'importance de l'agitation et donc les effets de l'explosion. La pression et surtout la vitesse de flamme de l'explosion est d'autant plus élevée que la turbulence est forte.

4. comburant

Le plus généralement c'est l'oxygène de l'air qui intervient comme comburant dans les explosions industrielles.

En-dessous d'une certaine teneur (concentration limite en oxygène) la réaction d'explosion ne peut se faire et ne peut donc donner lieu à une explosion.

Il faut en général descendre en-dessous de 6 à 8 % d'oxygène pour les gaz et en-dessous de 10 % d'oxygène pour les poussières pour empêcher l'explosion de se produire. Cette teneur n'empêche pas la poursuite de l'incendie dans des produits granulaires pulvérulents.

Parfois, pour des produits pulvérulents très réactifs la teneur limite en oxygène pour laquelle l'explosion n'est plus possible peut être de l'ordre de 5 %.

Pour caractériser précisément cette teneur (concentration limite en oxygène), des essais sont nécessaires.

5. sources d'inflammation

L'énergie de la source d'inflammation doit être suffisamment grande pour amorcer l'inflammation de l'atmosphère dangereuse (volume gazeux ou nuage de poussières).

Les types de sources d'inflammation susceptibles de provoquer une explosion sont décrites précédemment (causes d'une explosion et d'un incendie).

L'aptitude à l'inflammation des poussières dépend de la nature de la poussière, de sa répartition granulométrique, de la concentration et de l'homogénéité du nuage de poussières.

Pour qualifier l'aptitude à l'inflammation par étincelle, on détermine la plus faible valeur de l'énergie de l'étincelle (énergie minimale d'inflammation) permettant d'obtenir une inflammation du nuage de poussières. Avec l'appareil Hartmann, décrit à la figure 11 ci-après, il est courant de trouver des valeurs s'échelonnant de quelques milli-joules à plusieurs joules. Mais récemment, certains auteurs ont pu montrer expérimentalement qu'on pouvait trouver des inflammations des nuages de poussières pour des valeurs d'énergie de l'ordre du milli- joule, donc assez voisines de celles des gaz.

Les étincelles électrostatiques faiblement énergétiques peuvent donc constituer pour certaines poussières des sources d'inflammation active.

Les caractéristiques de l'étincelle, tension, intensité et surtout durée ont une influence considérable sur l'énergie minimale d'inflammation.

6. paramètres d'explosivité

Deux groupes de paramètres permettent de caractériser le risque d'explosion du aux mélanges poussières/air dans les installations industrielles :

- L'énergie minimale d'inflammation (EMI) et certains des paramètres d'inflammabilité, caractérisant le risque incendie,
- Les paramètres d'explosivité qui vont être développés ici : Limite Inférieure d'Explosivité (LIE), Pression maximale d'explosion (P_{max}), ...

❖ Energie minimale d'inflammation

C'est la quantité la plus faible d'énergie à appliquer à un combustible pour l'enflammer lorsqu'il est en mélange avec l'air. Nous nous intéressons ici à l'inflammation des atmosphères explosives de gaz, vapeurs et poussières combustibles mélangées avec l'air. L'énergie minimale d'inflammation est souvent caractérisée par l'énergie de l'étincelle d'une décharge capacitive.

L'énergie minimale d'inflammation des nuages de poussières peut être déterminée dans l'inflammation « Hartmann ». L'inflammation est réalisée par une étincelle électrique.

Pour les produits agro-alimentaires, à titre indicatif les énergies minimales d'inflammation les plus faibles mesurées sont d'environ 30 milli-joules (amidon de blé, sucre).

Les énergies minimales d'inflammation des gaz sont nettement plus faibles : 0,28 milli-joule pour le méthane par exemple.

❖ *limite inférieure d'explosivité*

C'est la concentration la plus faible en combustible qui est capable de conduire à la propagation d'une flamme dans un nuage homogène poussière/air. Pour les gaz comme pour les poussières, il existe une limite inférieure et une limite supérieure d'explosivité qui sont caractéristiques d'un produit donné. A l'intérieur de ces limites on se trouve dans le domaine d'explosivité. Pour les poussières, seule la limite inférieure d'explosivité est mesurable expérimentalement.

La limite supérieure d'explosivité des nuages de poussières est difficile à déterminer, elle est généralement supérieure à quelques kg/m^3 . Pour la majorité des poussières agro-alimentaires (grains inférieurs à 0,1 mm) la limite inférieure d'explosivité est de l'ordre de 50 g/m^3 . Une telle concentration n'existe généralement pas en permanence dans des ateliers industriels ; il serait d'ailleurs impossible de travailler dans de telles conditions. Par contre, dans des appareils, les broyeurs notamment, une telle concentration est souvent dépassée. Il n'en demeure pas moins vrai que, dans de nombreux cas, une concentration dans le domaine d'explosivité n'est obtenue qu'après soulèvement de poussières déposées par l'action de l'onde de pression d'une première explosion qui se déplace en avant de son front de flamme. C'est souvent ainsi qu'on obtient une explosion secondaire.

La limite inférieure d'explosivité est déterminée conformément à la norme CEI 31 H, GT, partie 2.5. Il est admis que les concentrations mesurées avec l'appareil constitué par une sphère de 20 l (figure 12), utilisé pour la mesure de la pression d'explosion et de la vitesse maximale de montée en pression n'ont qu'une valeur essentiellement indicative. Les mesures faites dans une chambre de 1 m^3 apparaissent plus représentatives. A titre indicatif, la limite inférieure d'explosivité peut varier de 30 g/m^3 pour un échantillon d'amidon de blé de granulométrie très fine à 750 g/m^3 pour un échantillon d'avoine et d'orge de granulométrie grossière d'après des résultats d'essais réalisés à l'INERIS.

❖ *Pression maximale d'explosion*

C'est la valeur maximale de pression obtenue dans un récipient fermé lors de l'explosion d'une atmosphère explosive de composition donnée dans des conditions d'essais spécifiées.

La valeur la plus élevée est obtenue pour une concentration donnée.

Cette mesure peut être obtenue à partir d'une mesure dans une chambre de 1 m^3 "cubique" telle que décrite dans la norme CEN 21184/1.

En fait, il est courant que la pression maximale d'explosion P_{max} soit déterminée à partir d'essais en chambre de 20 l qui permettent d'obtenir la courbe de variation de la pression maximale en fonction de la concentration. Selon le type de poussières agro-alimentaires, la valeur de la pression maximale est variable et peut varier à titre indicatif de 4 à 10 bars.

❖ *vitesse maximale de montée en pression*

C'est la valeur maximale de la montée en pression par unité de temps obtenue dans des conditions d'essais spécifiées lors des explosions de toutes les atmosphères explosives étudiées dans le domaine d'explosivité. Elle caractérise l'explosivité des poussières (violence d'explosion) et permet de dimensionner les mesures de protection contre l'explosion (évent, suppresseur d'explosion).

La vitesse maximale de montée en pression $(dp/dt)_{\max}$ dans un appareil cubique est liée au volume de l'appareil (V) où se déroule l'explosion par une relation de la forme :

$$K = (dp/dt)_{\max} V^{0,33}$$

K est une constante qui dépend principalement de la chambre d'essai du produit, et pour un même produit de la nature de la poussière et de son état (granulométrie, humidité).

Pour des turbulences dites "modérées", la constante appelée dans ce cas K_{st} est déterminée selon EN 26184/1 par des essais en chambre de 1 m³ "cubique". Pour des questions de commodités, le K_{st} est souvent déterminé par des essais en chambre de 20 l.

Pour des turbulences dites "fortes", la constante appelée dans ce cas K_{maxt} est déterminée selon NFU 54-540 par des essais en chambre 1 m³ "allongée".

Les poussières sont classées selon leur explosivité, et par exemple pour le K_{st} , il existe trois classes :

$$\begin{aligned} \text{ST1} &= 0 \text{ bar.m.s}^{-1} - < K_{st} < 200 \text{ bar.m.s}^{-1} \\ \text{ST2} &= 200 \text{ bar.m.s}^{-1} < K_{st} < 300 \text{ bar.m.s}^{-1} \\ \text{ST3} &= K_{st} > 300 \text{ bar.m.s}^{-1} \end{aligned}$$

A titre indicatif, le K_{st} de poussières agro-alimentaires varie de 50 bar.m.s⁻¹ à un peu plus de 200 bar.m.s⁻¹.

Tous les paramètres d'explosivité décrits ne concernent que les processus de combustion en enceintes fermées cubiques de volume limité dans lesquelles la combustion se déroule relativement lentement et se propage sans induire d'importants écoulements de gaz.

IV-2-4-3-3-C. MESURES DE MAITRISE DES RISQUES D'EXPLOSION

La réglementation participe à la maîtrise des risques d'explosion.

Les quatre principales étapes cette dernière sont :

1. L'identification des zones susceptibles de présenter des risques d'explosion et des sources d'inflammation,
2. L'évaluation de la probabilité d'occurrence (de la formation d'une atmosphère explosive et de la présence d'une source d'inflammation) et de la gravité prévisible,
3. Le traitement des risques préalablement identifiés et évalués, par des mesures de prévention et des moyens de protection.
4. La documentation (formalisation des actions précédemment menées), afin d'être en cohérence avec le document unique.

❖ **CONTEXTE REGLEMENTAIRE**

➤ **Directive « ATEX » :**

- Directive 1999/92/CE du 16 décembre 1999, concernant les prescriptions minimales visant à améliorer la protection en matière de sécurité et de santé des travailleurs susceptibles d'être exposés au risque d'atmosphère explosive ;
- Directive 94/9/CE du 23 mars 1994, concernant les appareils et les systèmes de protection destinés à être utilisés en atmosphère explosible.

Ces deux directives sont transposées en droit français (code du travail notamment) et d'application obligatoire pour tous les secteurs industriels depuis le 1er juillet 2003.

➤ **Code du travail :**

- Articles R. 4227-42 à R. 4227-54 du Code du travail (obligations de l'employeur relatives à la prévention des explosions).
- Article R. 4216-31 du Code du travail (obligations du maître d'ouvrage relatives à la prévention des explosions).
- Arrêté du 4 novembre 1993 relatif à la signalisation de sécurité et de santé au travail, complété par un arrêté du 8 juillet 2003.
- Arrêté du 8 juillet 2003 relatif à la protection des travailleurs susceptibles d'être exposés à une atmosphère explosive.
- Arrêté du 28 juillet 2003 relatif aux conditions d'installation des matériels électriques dans les emplacements où des atmosphères explosives peuvent se présenter.
- Décret n° 2002-1553 du 24 décembre 2002 relatif aux dispositions concernant la prévention des explosions applicables aux lieux de travail, créant les articles R232-12-23 à 29
- Décret n° 2002-1554 du 24 décembre 2002 relatif aux dispositions concernant la prévention des explosions que doivent observer les maîtres d'ouvrage lors de la construction des lieux de travail, modifiant l'article R354-4-17
- Décret n° 96-1010 du 19 novembre 1996 relatif aux appareils et aux systèmes de protection destinés à être utilisés en atmosphère explosible.

❖ **Code de l'environnement**

➤ **Rubrique 2160 de la nomenclature des installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE) :**

- Arrêté du 29 mars 2004 relatif à la prévention des risques présentés par les silos de céréales, de grains, de produits alimentaires ou de tout autre produit organique dégageant des poussières inflammables, complété par un arrêté du 23 février 2007.
- Arrêté du 28/12/07 relatif aux prescriptions générales applicables aux installations classées soumises à déclaration sous la rubrique n° 2160 " Silos et installations de stockage en vrac de céréales, grains, produits alimentaires ou tout produit organique dégageant des poussières inflammables, y compris les stockages sous tente ou structure gonflable ", modifié par un arrêté du 9 février 2010.

➤ **Rubriques 2260 de la nomenclature ICPE :**

• Arrêté du 18/02/10 relatif à la prévention des risques accidentels présentés par certaines installations classées pour la protection de l'environnement soumises à autorisation sous la rubrique n° 2260 " broyage, concassage, criblage, déchiquetage, ensilage, pulvérisation, trituration, granulation, nettoyage, tamisage, blutage, mélange, épluchage et décortication des substances végétales et de tous produits organiques naturels, y compris la fabrication d'aliments composés pour animaux, mais à l'exclusion des activités visées par les rubriques nos 2220, 2221, 2225 et 2226, mais y compris la fabrication d'aliments pour le bétail ».

• Arrêté du 23/05/06 relatif aux prescriptions générales applicables aux installations classées soumises à déclaration sous la rubrique n° 2260 « broyage, concassage, criblage, déchiquetage, ensilage, pulvérisation, trituration, nettoyage, tamisage, blutage, mélange, épluchage et décortication des substances végétales et de tous produits organiques naturels, à l'exclusion des activités visées par les rubriques nos 2220, 2221, 2225 et 2226, mais y compris la fabrication d'aliments pour le bétail ».

❖ **Identification**

L'analyse conjointe de la nature des procédés mis en œuvre, des installations exploitées et des propriétés des produits utilisés va permettre : d'identifier, de classer et de signaler les zones susceptibles de présenter un risque d'explosion de poussières.

Tableau IV-1 : Classement similaire au classement des zones concernées par le risque d'explosion de substances inflammables (gaz, vapeur, brouillard)

Zone	Définition
20	Emplacement où une atmosphère explosive sous forme de nuage de poussières combustibles est présente en permanence ou pendant de longues périodes ou fréquemment (>1000 H/an*).
21	Emplacement où une atmosphère explosive sous forme de nuage de poussières combustibles est susceptible de se présenter occasionnellement en fonctionnement normal (100 à 1000 H/an*).
22	Emplacement où une atmosphère explosive sous forme de nuage de poussières combustibles n'est pas susceptible de se présenter en fonctionnement normal ou, si elle se présente néanmoins, n'est que de courte durée (10 à 100 H/an*).

De ce classement découle la signalisation de ces zones et le choix des appareils installés dans ces zones :

Tableau IV-2 : Appareils installés dans les zones

Zone	Catégorie des appareils	Définition
20	1D*	Fonctionne en sécurité en mode normal et malgré deux défauts simultanés
21	2D (ou 1D)	Fonctionne en sécurité en mode normal et malgré un défaut
22	3D (ou 1D ou 2D)	Fonctionne en sécurité en mode normal

❖ **Documentation**

La dernière phase de la maîtrise des risques d'explosion est la formalisation par écrit des trois phases précédentes, en cohérence avec le document unique.

Ce document unique est une évaluation des risques de l'entreprise (articles L4121-3 et R4121-1 notamment du code du travail). Il permet de lister et hiérarchiser les risques pouvant nuire à la sécurité de tout salarié et de préconiser des actions visant à les réduire voire les supprimer.

➤ **Sauvetage**

Les sauvetages sont prioritaires et sont à effectuer en tenue de feu, avec appareil respiratoire isolant (ARI).

• **Etablissements**

Les établissements peuvent être réalisés en eau ou en solution moussante (bas, moyen ou haut foisonnement).

➤ **Sécurité du personnel**

Les éléments suivants sont à prendre en compte afin d'assurer la sécurité du personnel :

- Engagement minimum du personnel
- Établissement d'un périmètre de sécurité (public) et d'une zone d'exclusion (intervenants).
- Proscrire tout passage/positionnement face aux événements de surpression
- Éviter toute mise en suspension de poussières combustibles
- Utilisation exclusive d'appareils antidéflagrants
- Établir un moyen en eau en protection pour toute ouverture de trappe, capots etc., qui doit être effectuée progressivement.
- Privilégier l'utilisation d'émetteurs récepteurs dans la gamme des 400 MHz (meilleure portée dans les structures)
- Prendre en compte le risque de chute de hauteur (balisage des trous et trappes, longe de maintien au travail, lot de sauvetage et de protection contre les chutes (LSPCC), sécurisation de la zone d'intervention par le groupe de reconnaissance et d'intervention en milieu périlleux (GRIMP) ou une unité sauvetage-déblaiement (SDE))
- Tenue de feu complète, avec ARI si besoin. [47](voir annexe)

V-2-4-3-4. RISQUES CHIMIQUES

Parmi les risques chimiques rencontrés, on peut citer :

• Agression chimique par contact avec des produits de nettoyage et de désinfection des locaux de travail... Toutes les opérations d'entretien et de nettoyage font appel, pour débarrasser des surfaces inertes (sols, murs, plans de travail, ...) de toutes souillures visibles et inactiver ou tuer les micro-organismes présents, à des agents détergents, désinfectants, décapants, détartrants qui utilisent souvent des produits chimiques très agressifs susceptible de

provoquer des intoxications par inhalation ou absorption et des brûlures cutanées ou oculaires, ou des sensibilisations allergiques.

- Ces pathologies irritatives et/ou allergiques atteignent le plus souvent la peau (dermites, eczéma), suivies des atteintes des muqueuses oculaires (conjonctivite), nasales (rhinite) et bronchiques (asthme...).

- Intoxication par les aérosols (brouillards de particules liquides) et fumigeant (gaz) insecticides et acaricides qui provoquent des irritations des muqueuses oculaires et respiratoires, des céphalées, des nausées et des vomissements, des dermatoses, mais aussi des troubles chroniques, hépatiques, rénaux ou nerveux.

- Possibilités de libération de gaz toxiques due à la fermentation des produits d'ensilage (dioxyde d'azote NO₂, monoxyde de carbone CO, dioxyde de carbone CO₂) induisant des risques d'intoxication (la maladie des silos est due à l'inhalation de dioxyde d'azote).[42]

IV-2-4-3-5. RISQUES TOXIQUES

❖ Fumées

Dans le cas d'explosion de poussières agro-alimentaires et d'incendies de produits agro-alimentaires, c'est généralement le monoxyde de carbone produit en grande quantité par la combustion des poussières qui est toxique pour les personnes.

❖ Effets thermiques

Les flux thermiques dégagés par la combustion de matières peuvent engendrer à la fois :

- Des brûlures "graves" pour les personnes ;
- Des effets sur les structures pouvant conduire à l'effondrement de constructions.

❖ Effets sur l'homme

L'effet sur l'homme du flux thermique dégagé par un incendie est surtout lié à la durée du temps d'exposition.

A titre indicatif, les courbes du flux minimal létal et du flux correspondant aux blessures sérieuses données à la figure 20 montrent qu'elles sont, en fonction du temps d'exposition (s), les intensités du flux rayonné (kW/m²) nécessaires.

Des seuils caractéristiques des flux thermiques de plusieurs minutes, respectivement de 5 kW/m² pour l'apparition de la létalité et de 3 kW/m² pour la limite des effets significatifs sont retenus dans le cadre des études de dangers.

IV-2-4-3-6. RISQUES ALLERGIQUES

Les poussières de farine et de céréales, les parasites (acariens...) ou micro-organismes (moisissures...) omniprésents dans les minoteries, peuvent être responsables de fréquentes réactions allergiques. De nombreux pneumallergènes sont retrouvés dans les poussières de céréales, particulièrement les endotoxines des bactéries et des toxines fongiques dont le rôle majeur dans l'inflammation de l'arbre respiratoire explique l'apparition de bronchites chroniques.

L'exposition aux poussières de farine est particulièrement nocive aux voies respiratoires, car la farine est une substance très volatile et les particules en suspension sont aisément inhalées, pénétrant jusqu'aux alvéoles pulmonaires : les maladies allergiques induites sont l'asthme, épisodes successifs ou le rejet de l'air est difficile et pénible, et la rhinite avec éternuements, écoulement nasal, larmoiements, picotements laryngés, avec souvent surinfection provoquant des sinusites.

Le fort dégagement de poussières est généralement accidentel (débouillage d'une machine, arrachement de manches, nettoyage d'un plansichter, ruptures et déversements de sacs, erreurs lors de la vidange ou remplissage de silos ...), mais également, il y a une accumulation progressive de poussières très fines qui recouvre le sol, les parois des silos, des bâtiments et des locaux occupés par le personnel, les chemins de câbles, les gaines, les canalisations, les appareils et les équipements, notamment dans tous les volumes morts, les recoins et endroits confinés difficilement accessibles au nettoyage.

Les transporteurs et convoyeurs, les postes d'ensachage, les aires de chargement et de déchargement et les abords des silos sont particulièrement concernés par l'empoussièrément de l'air et des surfaces de travail ou de circulation.[42]

IV-2-4-3-7. AUTRES RISQUES NON SPECIFIQUES

Les manipulations et manutentions manuelles, les chutes de plain-pied du fait de sols souvent rendus glissant à la suite de salissures dues à la présence de farine et de déchets au sol, à l'encombrement des locaux..., les gênes auditives provoquées par le travail au voisinage de machines bruyantes, les contraintes du travail de nuit et posté, complètent le tableau des risques.

Les maladies professionnelles les plus fréquentes concernent surtout des affections périarticulaires et des affections chroniques du rachis lombaire (port de charges).

IV. CONCLUSION

L'identification des risques est une étape très importante et indispensable dans toutes les industries ; elle permet de classer les différents risques présents selon leur nature , leur origine, leur probabilité d'occurrence , leur effet pour pouvoir mettre en place les différents moyens de protection ainsi que les mesures de prévention convenable aux différents types de risque pour assurer la sécurité des salariés , équipements et de l'environnement dans ces industries .

CHAPITRE V : NOTIONS SUR LES EXPLOSIONS DES POUSSIÈRES / MESURES DE PRÉVENTION ET MISE EN PLACE DE PROTECTION

V-1. INTRODUCTION

Les explosions de poussières, dans l'industrie en général et dans l'industrie agro-alimentaire en particulier, sont loin de représenter un phénomène nouveau ; elles ont attiré depuis longtemps l'attention et ont fait l'objet de nombreux travaux pour tenter d'expliquer leurs causes et rechercher les moyens de les éviter.

Dans l'industrie, toute installation dans laquelle des poussières au moins partiellement inflammables sont fabriquées ou mises en œuvre, peut être soumise à un risque d'explosion de poussières dans certaines conditions de concentration en présence d'une source d'inflammation.

Les effets de l'explosion dus à l'augmentation de la pression peuvent être limités, et se traduire par des dégâts dans une seule installation. Mais quelquefois, des dépôts de poussières inflammables peuvent être soulevés par les effets du souffle d'une première explosion ("explosion primaire") et générer une, voire des "explosions secondaires" qui sont susceptibles de provoquer des dégâts considérables conduisant à une destruction presque totale des installations industrielles et d'entraîner des dommages graves aux personnes.

C'est particulièrement le cas pour l'industrie agro-alimentaire, où la plupart des catastrophes qui ont eu lieu n'ont pas été produites par une seule explosion, mais deux ou plusieurs explosions successives qui ont atteint une grande partie des zones "empoussiérées", même celles où les poussières n'étaient préalablement pas en suspension dans l'air.

Les explosions peuvent aussi se produire en raison de l'utilisation de gaz et liquides inflammables dans les installations (combustibles, produits de traitement, solvants, ...).

L'industrie agro-alimentaire est confrontée également à des incendies impliquant les matières stockées, dont les conséquences ne sont toutefois pas généralement aussi dramatiques pour les personnes que celles des explosions, mais qui conduisent parfois à la destruction complète des installations.

Les incendies résultent de la combustion de produits agro-alimentaires ou d'autres produits combustibles constitutifs des bâtiments et appareils qui peuvent aussi s'enflammer ou contribuer de façon significative au développement d'un incendie.

V-2. HISTORIQUE

Historiquement, depuis plus de 200 ans, on signale "des coups de poussières".

Le 14 décembre 1785 à Turin, une explosion de poussières de farine survenue dans un entrepôt de serait semble-t-il la première explosion de poussières reconnue et signalée. Elle s'est produite pendant la période durant laquelle les moulins à vent utilisés depuis le début du 14^{ème} siècle pour le broyage des céréales, tout d'abord en Amérique et ensuite en Europe, ont été remplacés par des moulins à vapeur nettement plus performants

En 1887, des explosions qui se sont produites en Allemagne aux nouveaux moulins de la Weser à Hameln et qui causèrent la mort d'une trentaine de personnes et en blessèrent également un grand nombre.

Au 20^{ème} siècle, la fréquence des explosions de poussières s'est accrue surtout en raison du développement de l'industrialisation.

A partir des années 60, des explosions de poussières surviennent fréquemment dans les stockages de produits agro-alimentaires, notamment aux Etats-Unis qui connaissent à cette époque un fort développement de l'agriculture.

En 1982 Une étude américaine publiée révèle plus de 200 explosions ayant fait 200 morts dans l'industrie agro-alimentaire dans la période 1960-1980 notamment dans les silos de stockage.

A l'aube des années 80, plusieurs explosions aux conséquences dramatiques mettant en jeu des poussières agro-alimentaires ont eu lieu dans le monde.

En février 1979, en Allemagne, une explosion a dévasté une minoterie à Brême faisant 14 morts.

En décembre 1977, aux Etats-Unis, deux explosions particulièrement dévastatrices sont survenues, l'une dans les silos de la Continental à Westwego en Louisiane (36 morts, 15 blessés), l'autre dans les silos de la Farmers Export (18 morts, 23 blessés).

A la suite de ces graves explosions de 1977, une action importante de recherche a été entreprise aux Etats-Unis, qui a conduit à la révision en 1980 de la norme pour la prévention des incendies et des explosions dans les silos de produits agro-alimentaires élaborée par le NFPA en 1973.

En 1979 ; à la même époque, des accidents dans des silos de stockage de produits agro-alimentaires ont eu lieu dans d'autres pays : Canada, Belgique et surtout Espagne où une explosion dans les silos de la Coopérative Guissona à Lerida a fait 10 morts et 13 blessés.

Jusqu'en 1975, en France, les industries de stockage et de traitement des grains semblent avoir été relativement épargnées comparativement à l'Allemagne et surtout aux Etats-Unis.

Le sinistre le plus grave enregistré jusqu'à cette date semble être une explosion dans un silo à maïs (Lestrem) qui n'a pas fait de victime.

Jusqu'en 1982, des explosions ont eu lieu de façon sporadique dans les installations des silos français dont la plus grave est celle d'un silo de tourteaux d'huilerie à Bordeaux (1 mort, 12 blessés).

L'année 1982, a été marquée par deux explosions importantes en France, l'une dans une sucrerie à Boiry Sainte Rictrude et l'autre dans une malterie à Metz. L'explosion des silos de Metz d'octobre 1982, qui a fait 12 victimes et entraîné des dégâts matériels considérables, a marqué les esprits et a fait réagir les pouvoirs publics et les organismes de prévention français.

Cette prise de conscience collective des dangers que pouvaient présenter les stockages de produits agro-alimentaires, s'est traduite par l'arrêté du 11 août 1983.

Pour faciliter la mise en application de cet arrêté, un effort normatif a été mené, qui a concerné trois aspects :

- Les systèmes d'atténuation des effets des explosions, en particulier les événements de décharge ;
 - conception générale des silos en vue d'une meilleure sécurité vis-à-vis de l'incendie et de l'explosion ;
 - La détermination des quantités de poussières explosives déposées.

Cependant, les travaux normatifs n'ont pu être menés à leur terme, que pour le premier et le troisième aspect, et n'ont pas répondu totalement aux objectifs assignés :

- Le calcul des surfaces d'événements indiqué dans la norme NFU 54-540, n'est pas adapté pour les plus gros silos (plus de 1 000 m³) que l'on trouve fréquemment dans de nombreuses installations de stockage ;
- La norme sur la conception générale des silos n'a pas pu être finalisée du fait de la très grande diversité des installations de stockage, mais aussi des types de cellules et de matières stockées, et de connaissances encore insuffisantes sur les phénomènes de propagation des explosions et d'inflammation des poussières agro-alimentaires dans les installations, et sur le comportement des structures aux effets de l'explosion.

Depuis 1982, année de l'accident de Metz, des explosions et des incendies continuent de se produire en France dans les silos de stockage de produits agro-alimentaires. D'après des données provenant de GROUPAMA sur les incendies et les explosions survenus dans les installations de stockage chez les assurés du groupe sur la période 1982-1990, il apparaît que sur cette période se sont produits en moyenne par an, une explosion grave et deux incendies importants. [43]

En 1993, l'explosion qui a dévasté le silo de Floriffoux en Belgique (4 morts).

En 1997, celle qui a détruit le silo de Blaye (11 morts) et dont les enseignements ont été pris en compte dans l'arrêté du 29 juillet 1998 sont là pour le rappeler. Par ailleurs, c'est avec ce type d'accident que l'on peut avoir ce que les assureurs appellent un "sinistre maximal possible" c'est-à-dire une destruction de la quasi-totalité des infrastructures existantes. Cela signifie donc, pour l'exploitant d'un silo, un arrêt total et parfois définitif de son activité.

Les incendies, qui ont une fréquence plus élevée que les explosions de poussières sont davantage redoutés en France par les exploitants de silos. Les incendies, s'ils n'ont pas de conséquences humaines dramatiques lorsqu'ils ne sont pas accompagnés d'explosion, peuvent conduire à un "sinistre grave" (donc moins important que le "sinistre maximum possible") qui pose cependant presque toujours des problèmes délicats, dont la première conséquence sera l'arrêt momentané de l'activité, et souvent la reprise de l'activité avec une capacité de stockage amoindrie si une unité de stockage doit être reconstruite.

Compte tenu des conséquences humaines, matérielles et économiques que peut avoir une explosion ou un incendie sur les activités de stockage de produits agro-alimentaires, il est apparu nécessaire d'établir un document sur les aspects de prévention et de protection contre les efforts

d'accidents provenant d'incendies et d'explosions dans les installations de stockage de produits agro-alimentaires et leurs équipements annexes.

V-3. QUELQUES DEFINITIONS IMPORTANTES

3-1. POINT DE RUPTURE

Le point d'éclair est la température la plus basse à laquelle une substance se vaporise dans un gaz, qui peut s'enflammer avec l'introduction d'une source de feu externe. Il existe deux méthodes principales pour mesurer un point d'éclair : cuvette ouverte et fermée.

Le test du point d'éclair en vase ouvert a lieu lorsque la substance est placée dans un récipient ouvert à l'extérieur. Sa température est ensuite progressivement augmentée et une source d'inflammation est passée par-dessus à intervalles réguliers. Une fois que la substance « clignote » ou s'enflamme, elle a atteint son point d'éclair.

Le test du point d'éclair en vase clos est effectué à l'intérieur d'un récipient scellé et la source d'inflammation est introduite dans le récipient. De ce fait, la substance n'est pas exposée aux éléments extérieurs au récipient, ce qui peut avoir un effet perturbateur sur les résultats de l'essai. Ceci, à son tour, conduit également à des points d'éclair plus bas, car la chaleur est emprisonnée à l'intérieur. Comme il est plus bas, le point d'éclair est également plus sûr pour une utilisation généralisée et, en tant que tel, est plus généralement accepté.

V-3-2. TEMPERATURE D'INFLAMMATION

Contrairement aux points d'éclair, la température d'inflammation ne nécessite pas de source d'inflammation. En d'autres termes, la température d'inflammation est la température la plus basse à laquelle un matériau volatil sera vaporisé en un gaz qui s'enflamme sans l'aide d'une flamme externe ou d'une source d'inflammation. En conséquence, la température d'inflammation est bien sûr supérieure au point d'éclair.

Généralement, les températures d'inflammation sont mesurées en plaçant la substance dans un récipient d'un demi-litre et à l'intérieur d'un four à température contrôlée. Les procédures standard actuelles pour de tels tests sont décrites dans la norme ASTM E659.

Il convient toutefois de souligner que ces deux termes ne sont pas des propriétés fondamentales et invariables appartenant aux substances. Il s'agit plutôt de résultats empiriques, glanés au moyen d'essais en laboratoire, qui peuvent varier en fonction des équipements utilisés, de la méthode choisie et de l'environnement dans lequel ils sont effectués (de l'ordre de 300 à 600 °C en nuage)

V-3-3. ENERGIE MINIMALE D'INFLAMMATION « EMI »

A l'exception du gluten, tous les produits ont des EMI supérieures à 300 mJ. Cela signifie qu'ils possèdent une faible sensibilité aux sources d'ignition électrostatiques. Une mise à la terre des appareils métalliques est suffisante pour prévenir tout risque d'ignition électrostatique. Le gluten est plus sensible aux sources d'ignition électrostatiques mais pas suffisamment pour que d'autres précautions soit nécessaires pour prévenir un risque d'ignition électrostatique.

V-3-4. CONCENTRATION EXPLOSIVE

Comme pour les gaz, on peut définir pour une poussière une concentration minimale explosive au-dessous de laquelle l'explosion ne peut se propager dans un nuage préformé. Mais autant cette grandeur peut être mesurée avec assez de précision dans le cas des gaz, autant il est difficile expérimentalement de réaliser des suspensions homogènes de poussières, surtout si elles sont grossières.

Disons que les concentrations minimales explosives des poussières inférieures à 100 µm se situent couramment dans la fourchette 20 à 100 g/m³; ceci correspond déjà à des nuages de poussières relativement denses.

La concentration maximale explosive des poussières, elle est encore bien plus incertaine et se situe dans la gamme de 1 à 3 Kg/m³. Ce sont là des concentrations que l'on ne peut trouver qu'exceptionnellement dans certains appareils de traitement par exemple.

La limite inférieure d'explosivité (LIE) de la poussière de blé est de 65 gr/m³.

V-3-5. POUVOIR CALORIFIQUE SUPERIEUR

Le pouvoir est de l'ordre de 30 à 60 MJ/kg:

Le PCS ou pouvoir calorifique supérieur est la quantité totale de chaleur dégagée à volume constant par la combustion d'un kg ou d'un Nm³ du combustible, sous une pression atmosphérique standard (1,01325 bar), l'eau formée pendant la combustion étant ramenée à l'état liquide et les autres produits à l'état gazeux.

Pour donner une simple définition du pouvoir calorifique supérieur, il s'agit d'une unité de mesure qui prend en compte non seulement la chaleur dégagée par la combustion, mais également la chaleur de condensation de la vapeur d'eau produite lors de cette combustion, que l'on appelle aussi chaleur latente. [48]

V-3-6. INDICE D'EXPLOSION

L'indice d'explosion est défini comme le produit de l'indice de sensibilité et celui de sévérité.

Cet indice sert à définir le danger relatif d'une poudre, allant de faible à sévère :

$$I_{\text{Explosion}} = \frac{(EMI \cdot TMI \cdot CME)_{\text{Charbon de Pittsburgh}}}{(EMI \cdot TMI \cdot CME)_{\text{Echantillon}}} \cdot \frac{(P_{\text{max}} \cdot dP/dt_{\text{max}})_{\text{Echantillon}}}{(P_{\text{max}} \cdot dP/dt_{\text{max}})_{\text{Charbon de Pittsbur}}}$$

L'indice d'explosion permet de classer le danger relatif des différents matériaux. [3]

V-3-7. TAUX D'HUMIDITE

(La norme commerciale est d'environ 14,5% pour les céréales)

Des produits, il convient de noter de manière très générale que c'est le paramètre déclencheur de la fermentation qui conduit à une montée de température qui généralement plafonne à 60-70°C.

V-3-8. VITESSE MAXIMALE DE MONTEE EN PRESSION « K_{st} » ET PRESSION MAXIMALE « P_{max} »

Tous les produits sont classés St1, ce qui signifie que les produits ont une violence d'explosion faible à modérée.

Les poussières sont classées selon leur explosivité, et par exemple pour le K_{st}, il existe trois classes :

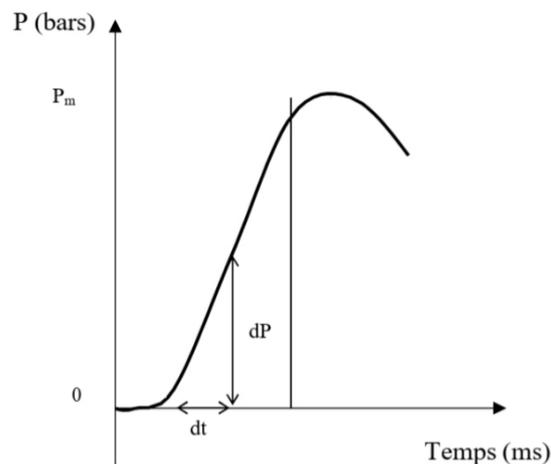


Figure V.1: Vitesse maximale de montée en pression

ST1 = $0 \text{ bar.m.s}^{-1} < K_{st} < 200 \text{ bar.m.s}^{-1}$ ST2
= $200 \text{ bar.m.s}^{-1} < K_{st} < 300 \text{ bar.m.s}^{-1}$ ST3 =
 $K_{st} > 300 \text{ bar.m.s}^{-1}$

A titre indicatif, le « K_{st} » de poussières agro-alimentaires varie de 50 bar.m.s⁻¹ à un peu plus de 200 bar.m.s⁻¹.

Les autres produits ont une violence d'explosion plus importante. La pression maximale d'explosion des farines est inférieure à 7.8 bar.

V-3-9. TEMPERATURE D'AUTO INFLAMMATION -NUAGE- « TAI »

Les « TAI » sont toutes supérieures à 400°C, par conséquent le choix d'équipements de classe de température T3 (température maximum de surface 200°C) ou mieux, garantira l'absence de tout risque d'inflammation de nuages de poussières à partir des surfaces chaudes dans l'environnement de travail. Lorsque les TAI dépassent 452°C, alors une classe de température T2 (température maximum de surface 300°C) sera acceptable.

Les surfaces chaudes dans les entreprises, telles que les moteurs, les coffrets d'alimentation électrique, les câbles, les paliers machines, les pièces en frottement ont une température de l'ordre de 100°C.

V-3-10. TEMPERATURE D'AUTO INFLAMMATION-COUCHE- « TAI »

Les « TAI » mesurées sont supérieures à 450°C, excepté pour le gluten ayant une TAI de 390°C.

L'utilisation d'équipements de classe « T3 » ou mieux préviendra tout risque d'inflammation de poussières en couche à température ambiante, dans la mesure où celle-ci ne dépasse par 5mm d'épaisseur. Les températures d'inflammation en couche seront plus faibles pour des dépôts de poussières supérieurs à 5 mm d'épaisseur ou à l'intérieur des équipements fonctionnant à des températures élevées.

V-3-11. LIMITE D'INFERIORITE D'EXPLOSIVITE « LIE »

Dans l'étude « GAM 2002 », la LIE a été mesurée uniquement pour la farine blanche panifiable et se révèle supérieure aux valeurs attendues : 500-510 g/m³.

Dans l'étude « ANMF 2005 », la LIE a été estimée pour la farine entre 60 et 125 g/m³.

Ces résultats confirment avec plus ou moins de précaution qu'un nuage de poussière de farine doit être dense pour qu'il soit inflammable.

V-4. LOI CUBIQUE

Loi décrivant la relation entre le volume et la vitesse maximale de montée en pression :

$$(dp/dt)_{max} \cdot V^{1/3} = constante = Kst.$$

Pour les essais en *réceptacle de 1 m³* (voir figure V.2), les poussières sont placées dans un réservoir (V=5 l) extérieur à l'enceinte où se déroule l'explosion. La dispersion des poussières dans l'enceinte est généralement assurée au moyen d'un tube perforé de 3/4" de forme semi-circulaire, fixé le long de la paroi intérieure de l'enceinte. Les 20 ou 13 orifices du tube ont un diamètre de 5 ou 6 mm. De l'air comprimé (surpression de 20 bar) introduit dans le réservoir contenant les poussières provoque l'ouverture d'une capsule ou d'une vanne électropneumatique assurant une dispersion rapide de la poussière dans le réceptacle, afin qu'au moment de l'inflammation, le réceptacle contienne un mélange air / poussière suffisamment homogène à la concentration voulue.

Le délai d'amorçage, c'est-à-dire le temps écoulé entre le début de l'introduction des poussières dans l'enceinte et le déclenchement de la source d'inflammation, est fixé de façon à obtenir un degré de turbulence donné au moment de l'inflammation. Une turbulence est nécessaire pour maintenir les poussières en suspension, mais elle influe sur le déroulement de l'explosion. Plus le délai est court, plus la turbulence est élevée, ce qui se traduit par une augmentation de la vitesse maximale de montée en pression et de la pression maximale d'explosion. Toutefois, celle-ci tend vers un maximum qui se trouve être atteint pratiquement au moment où les poussières sont

totallement éjectées du réservoir, soit dans un délai de 0,6 s (voir figure V.3). Un délai d'amorçage inférieur à 0,6 s se traduit par une augmentation de la vitesse de montée en pression.

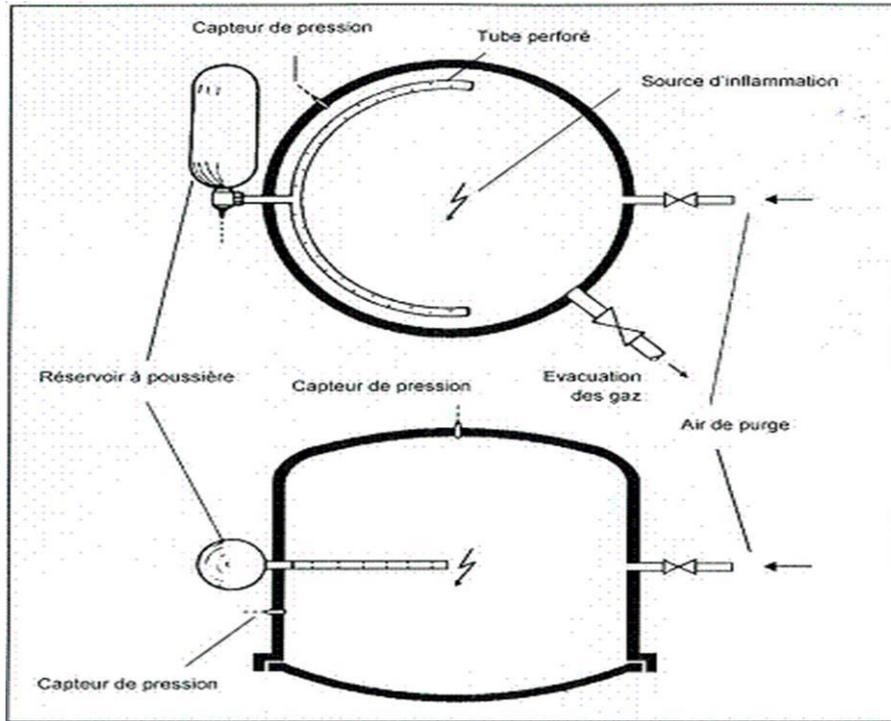


Figure V.2 : Schéma du récipient de 1 m³

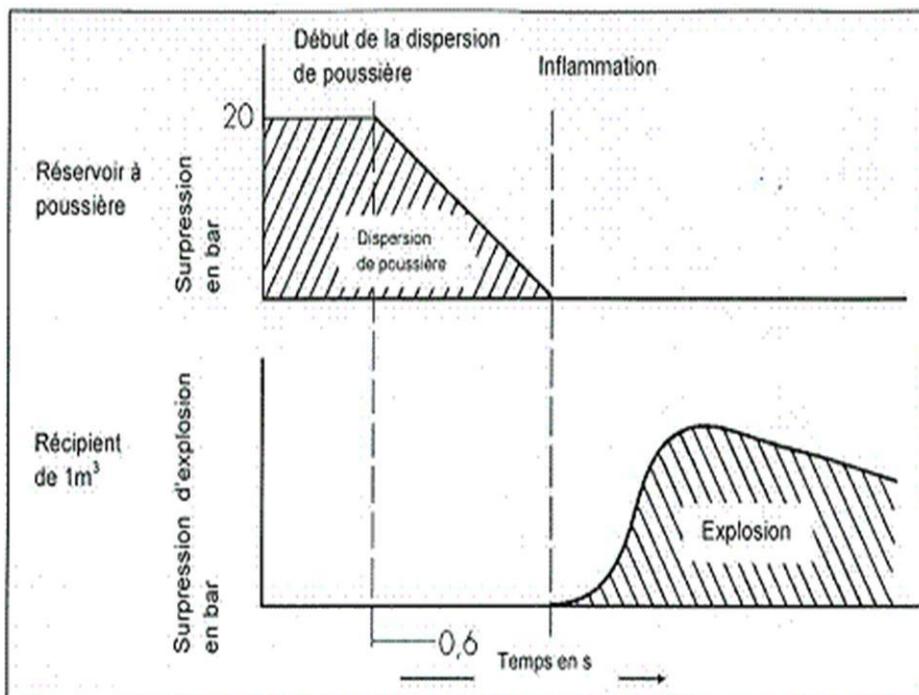


Figure V.3: Déroulement schématique du test de détermination de l'explosivité des poussières en récipient de 1 m³

Un délai de 0,6 s est donc adopté par convention pour tous les essais. L'inflammation du mélange air/poussières est déclenchée au centre de l'enceinte. La source d'inflammation est généralement constituée de deux détonateurs chimiques totalisant une énergie de 10 000 J. Deux capteurs fixés sur la paroi de l'enceinte enregistrent la pression en fonction du temps pendant l'explosion. Une série d'essais est réalisée en faisant varier la concentration de poussière dans un large domaine et en mesurant les pressions d'explosion et les augmentations de la vitesse de montée en pression. A partir d'une valeur de 500 g/m³, la concentration de poussière est augmentée par paliers de 250 g/m³ ou diminuée de moitié, de proche en proche, jusqu'à ce que la pression maximale d'explosion et la vitesse maximale de montée en pression soient établies. En réduisant encore la concentration selon le même principe, on établit la concentration pour laquelle l'inflammation du mélange air/poussières ne peut pas être obtenue, et ce au cours de trois essais successifs. Cette concentration est définie comme la limite inférieure d'explosivité des poussières.

Pour les essais en *sphère de 20l*, la méthode et la conception de l'appareillage sont identiques, dans le principe, à celles décrites pour le récipient de 1 m³. Les conditions aux limites sont définies de telle sorte que les résultats soient comparables aux valeurs obtenues dans le récipient de 1 m³.

Outre la taille de l'enceinte, les différences résident principalement dans la nécessité de réaliser un vide partiel dans la sphère avant de procéder aux essais (de telle sorte qu'après introduction des poussières, l'intérieur de la sphère soit à la pression atmosphérique), et dans le délai d'amorçage, qui n'est que de 0,06 s. De plus, l'ensemble du domaine de concentrations est couvert en trois séries d'essais, la pression maximale d'explosion et la vitesse maximale de montée en pression étant établies en faisant la moyenne des valeurs maximales des trois séries.

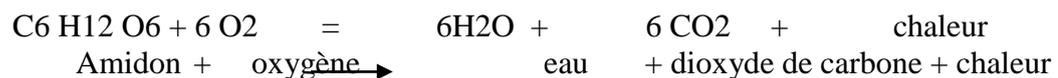
La loi cubique « $(dp/dt)_{max} \cdot V^{1/3} = const = K_{St}$ » permet de calculer la valeur K_{St} (indépendante du volume) à partir de la vitesse maximale de montée en pression. La source d'inflammation est la même que dans le récipient de 1 m³, à savoir deux détonateurs chimiques totalisant une énergie de 10 000 J

V-5. STOCKAGE ET TRANSPORT DES PRODUITS AGRO-ALIMENTAIRES

V-5-1. GENERALITES

L'activité biologique du grain stocké est conditionnée par l'état du milieu dans lequel il se trouve.

Dans un tas de grains (céréales), l'oxygène de l'air interstitiel va permettre la respiration selon la formule :



L'intensité de cette réaction est d'autant plus importante que la température, l'humidité et l'oxygène sont élevés. Or, la respiration produit de la chaleur et de l'humidité qui ont tendance à accélérer le processus et à ainsi créer une réaction en chaîne de plus en plus rapide. Elle s'accompagnera également d'un développement des moisissures qui provoquent elles-mêmes un échauffement.

Toutefois, cet auto-échauffement a des limites puisque l'oxygène devient très rapidement un facteur limitant. En l'absence d'oxygène, la respiration est remplacée par la fermentation qui se caractérise par un plus faible dégagement de chaleur.

Les conséquences directes de ce mécanisme sont l'échauffement de la masse de grain et une perte de la valeur nutritive du produit stocké.

Pour limiter ces effets qui peuvent engendrer d'importantes répercussions économiques, le grain est maintenu à l'état de « vie ralentie » en maîtrisant la température et l'humidité.

Dans les conditions normales de stockage, la vitesse d'échauffement d'une céréale est très lente.

Le grain récolté respire en absorbant de l'oxygène et en rejetant du gaz carbonique.

Cette respiration est d'autant plus forte que le grain est humide et chaud. Or, cette respiration produit de la chaleur et de l'humidité favorables à son accélération; elle favorise également le développement des moisissures, levures, bactéries qui provoquent elles-mêmes un échauffement.

Les conséquences directes de ce mécanisme sont un échauffement naturel de la masse de grains et une perte de la valeur nutritive du produit stocké.

Cet échauffement limité et contrôlable n'est toutefois pas reconnu comme pouvant être à l'origine d'une combustion spontanée des céréales.

La vitesse d'échauffement d'une céréale ayant une teneur en eau normale (15 %) est très lente.

A titre d'exemple : 1 kg de blé à 15% d'humidité (taux commercial 15,5 %) et à une température de 14°C dégage par jour 0,012 W. De même une tonne de blé à 16 % d'humidité et à une température de 15°C produit 0,20 Kcal par heure par la respiration du grain.

Une étude, menée conjointement par l'Institut National de Recherche Agronomique et l'Institut Technique des Céréales et Fourrages a mis en évidence que la montée de la température d'une masse de grains, même chauffée artificiellement par une boule métallique maintenue (grâce à une résistance électrique) à 60 degrés, est extrêmement lente.

L'expérimentation a montré que le front chaud, en l'absence de ventilation, se déplace vers le haut à une vitesse de l'ordre de 3 à 4 cm par jour (37 jours pour qu'à 1,50 m la température de la masse passe de 7°C à 30 °C).

Une mesure périodique de la température est donc suffisante, d'autant que pour l'exploitant, ce n'est pas seulement le risque d'incendie qui est à redouter mais aussi une perte quantitative et qualitative qui aurait d'importantes répercussions sur la valeur marchande du produit.

Notons que, pour des récents essais effectués par ARVALIS sur des lots de céréales très humides, l'échauffement de la masse n'a pas dépassé une température de 55°C.

V-5-2. SILOS DE STOCKAGE

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.

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,

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.

Dans la majorité des cas, le déchargement des camions et des trains se fait par gravitation dans des fosses de réception.

Pour le déchargement des bateaux, le déchargement gravitaire est remplacé le plus souvent par des déchargements pneumatiques plus performants. Cette technique est parfois utilisée aussi pour le déchargement des camions et des trains.

Concernant les silos plats, pour ceux qui ne comportent pas de circuit de manutention pour l'ensilage, les camions ou les trains déversent en général leurs produits dans une trémie réceptive

située à l'extérieur, et les produits sont transportés à l'intérieur du silo par une "sauterelle".

Pour certains silos plats, à faible taux de rotation, dont l'ensilage et le déstockage est réalisé par "chouleur", les produits peuvent être déposés directement à l'intérieur des stockages par camions.

Les produits agro- alimentaires avant ensilage peuvent subir un traitement préalable consistant essentiellement à des opérations de nettoyage et de séchage.

Les produits transportés par route et par voie ferrée sont repris en général (à l'exception de certains silos plats notamment) après pesage sur bascule et déchargement dans les fosses de réception par des transporteurs installés dans des galeries souterraines, puis dirigés selon l'importance du site de stockage vers la ou les tour(s) de manutention.

Les produits transportés par voie fluviale ou maritime transitent fréquemment par une tour de réception (qui sert également à l'expédition) pour être pesés, avant d'être dirigés vers la ou les tour(s) de manutention. Le rôle dévolu aux tours de manutention est d'élever les matières, avec des élévateurs à godets en général, jusqu'au niveau de la partie supérieure des cellules de stockage pour l'ensilage.

Après les élévateur à godets, on trouve le plus souvent des transporteurs horizontaux (à bande ou métallique) pour le transport des produits agro-alimentaires vers les silos de stockage. Lorsque les silos sont éloignés des élévateurs à godets, des galeries de manutention aériennes abritant les transporteurs relient les différentes installations.

Dans le cas d'utilisation de transporteurs à bande pour l'ensilage en silos verticaux, le dernier engin est équipé en général d'un chariot distributeur mobile qui transfère les produits dans les cellules à travers des goulottes et des trappes.

Dans le cas d'utilisation de transporteurs métalliques (à chaîne) pour l'ensilage en silos verticaux, la distribution dans les cellules se fait souvent par des canalisations en place en permanence et des vannes guillotines.

L'ensilage en silos horizontaux est réalisé le plus souvent par un transporteur à bande situé au niveau du faitage. La distribution des matières dans les cellules se fait dans ce cas par un chariot mobile, complété dans certains cas, compte tenu des dimensions des cellules, par des dispositifs de chargement par projection, pouvant projeter les grains à plus de 30 mètres.

Dans certains silos horizontaux, l'ensilage des produits est réalisé à partir de portes latérales d'accès, soit par des sauterelles mobiles équipées éventuellement de projecteur, soit par des engins à moteur thermique (chouleur ou camion).

Le stockage des produits agro-alimentaires se fait dans des cellules de stockage, qui peuvent être, selon le cas, constituées de cellules verticales ou horizontales, en béton armé, en métal, ou en matériaux légers. Les cellules des silos horizontaux sont le plus souvent ouvertes.

Les produits stockés sont extraits des cellules, puis transportés par des engins de manutention vers les installations d'expédition en vrac ou les ateliers de conditionnement.

Le déstockage des cellules verticales se fait par des systèmes d'extraction situés à la base des cellules, déversant sur des transporteurs, qui sont installés dans des espaces sous cellules.

Le déstockage des cellules horizontales est réalisé, soit à partir de portes latérales par des chouleurs et des camions, soit par gravité à partir de trappes de vidange et de moyens complémentaires (chouleurs, extracteur).

Dans le cas de la vidange des cellules horizontales par des trappes, les transporteurs recueillant les produits sont installés en général dans des galeries souterraines.

Enfin, les produits sont dirigés vers les postes de conditionnement et d'expédition sacs et vrac.[43]

V-5-3. ACTIVITE DE STOCKAGE « TYPES DE CELLULES OU DE CAPACITES DE STOCKAGE »

Les différentes techniques sont utilisées pour réaliser les stockages :

- Stockage vertical en métal
- Stockage vertical en béton armé
- Stockage de type magasin ou stockage horizontal
- Stockage "dôme"
- Stockage aménagé dans des friches industrielles
- Stockage enterré
- Stockage sous structure gonflable

Soient :

❖ *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 oléo-protéagineux sont formés de cellules métalliques.

• ***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.

Néanmoins, la réalisation de cellules de très grande hauteur doit être entreprise en tenant compte de contraintes particulières (problème de disponibilité de terrain, nécessité d'être situé en bord de quai de déchargement, prévention et protection incendie et explosion,...) et d'utilisations spéciales (silos portuaires, silos à taux de rotation élevés, ...); en effet, de tels silos engendrent des problèmes d'exploitation importants (casse des grains, effets de voûte liés aux fortes pressions exercées sur les grains, ventilation de conservation des grains plus difficile, ...). La recherche d'économie dans les coûts de construction des silos de stockage a conduit les entreprises françaises à étudier la préfabrication d'éléments standardisés en béton armé en usine ou sur le chantier. Ces éléments sont assemblés sur le chantier. Ils permettent la réalisation de cellules de stockage rectangulaires carrées, octogonales ou circulaires, de petite ou de grande taille.

• ***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.

• ***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. Tout d'abord, on met en place une membrane gonflable sur la fondation. Cette membrane conçue en fonction des dimensions et de la forme choisies est ensuite gonflée. On projette alors de la mousse de polyuréthane sur la surface intérieure de la membrane et, parallèlement, on met en place des barres d'ancrage de conception spéciale qui

recevront le ferrailage. Ces barres sont noyées dans la première couche de mousse. L'étape suivante est la mise en place des armatures en fonction du dôme à réaliser. Enfin, on procède à la projection du béton, en mélange spécial de haute résistance, dont l'épaisseur des couches est définie et calculée en fonction des conditions d'utilisation du stockage "dôme". Pendant toutes ces opérations, la membrane sert de protection extérieure et de coffrage. 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.

• ***Stockage aménagé dans des friches industrielles***

Le stockage des produits agro-alimentaires peut être aussi réalisé dans d'anciens bâtiments industriels, aménagés en silos horizontaux. Le volume de stockage est délimité par des éléments préfabriqués en béton ou métalliques. Les bâtiments industriels doivent recevoir les aménagements nécessaires pour la prévention et la protection de l'incendie et de l'explosion.

• ***Stockage enterré***

Après création d'une tranchée en forme de "V" dans le sol, une cave bétonnée est réalisée; les déblais sont utilisés en remblais.

La réalisation de tels stockages nécessite des sols exempts d'eau et de bonne qualité mécanique. Cette technique est peu utilisée (quelques silos en France).

• ***Stockage sous structure gonflable***

Le stockage des produits agro-alimentaires, est réalisé sous une structure gonflable maintenue uniquement par la ventilation implantée sur un terrain stable avec un revêtement type « routier ». Le montage de l'ensemble est simple et rapide.

Un ensemble de longrines périphériques en béton posées directement sur le revêtement servent à l'amarrage de la structure et à l'étanchéité des eaux de pluie.

La construction de ce type de stockage doit prendre en compte des contraintes particulières, notamment la résistance à la prise d'air, le bruit des ventilateurs et la prévention et la protection de l'incendie.[43]

V-5-4. 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.

V-5-5. 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

V-5-6. VENTILATION

Généralement, la conservation des grains est réalisée par ventilation au débit moyen de 10 m³/h par m³ 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 (CO₂) ou en atmosphère confinée est peu utilisée pour les céréales.

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

V-6. NOTIONS SUR L'EXPLOSION DES POUSSIÈRES

V-6-1. DEFINITION DE L'EXPLOSION

« Une explosion est une transformation exo énergétique (physique et/ou chimique) au cours de laquelle il y a émission d'une onde de pression (subsonique ou supersonique), associée à divers flux de matière (missiles, toxiques, polluants) ou d'énergie (thermique, ionisante). » [49]

« Fait d'éclater violemment en projetant des fragments, en se brisant ; bruit ainsi provoqué : Rupture violente et accidentelle provoquée par une pression excessive : Explosion d'une chaudière. Manifestation soudaine et bruyante d'un sentiment, d'une réaction ; débordement : Une explosion de joie, de colère. Développement soudain qui rompt un équilibre, un état de stabilité ; boom : Explosion démographique. Chimie : Phénomène au cours duquel des gaz sous pression sont libérés ou engendrés en un temps extrêmement court.» [46]

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).

V-6-2. GENERALITES SUR L'EXPLOSION

L'explosion est la combustion rapide d'un mélange inflammable gaz, vapeur ou poussières avec l'air dans un espace confiné ou partiellement confiné. Dans les industries agro-alimentaires, les explosions de poussières sont possibles du fait des poussières formées lors de la manipulation ou du transport des produits. Des explosions peuvent aussi être dues aux gaz de pyrolyse formés ou du fait de l'utilisation de liquides ou de gaz combustibles.

Il n'y a possibilité d'une explosion de poussières que si un nuage inflammable de poussières existe à l'intérieur d'une installation et qu'une source d'inflammation provoque alors l'inflammation. Les particules autour de la source s'enflamment et servent de source d'inflammation au mélange air-particules adjacent, si bien qu'une zone de combustion -la flamme- se propage de proche en proche dans le nuage en transformant sur son passage le mélange réactif air-particules "froid" (température ambiante) en produits de combustion "chauds" (1 000°C à 2 000°C). Le mélange air-particules qui traverse la flamme subit en conséquence une forte dilatation thermique (volume multiplié par 5 au moins).

L'incendie nécessite la présence, au même moment et en même lieu, d'un combustible, d'un comburant et d'une source d'inflammation (triangle du feu). Trois autres facteurs sont nécessaires pour obtenir l'explosion : le combustible doit être convenablement dispersé, le mélange du combustible et du comburant doit se trouver dans le domaine d'explosivité et un confinement suffisant doit exister. On peut alors parler d'hexagone de l'explosion.

Cette "production de volume" est à l'origine de l'augmentation de la pression dans l'espace fermé où se produit l'explosion.

Lorsque l'explosion se produit, les effets de pression induits ne dépendent pas uniquement des propriétés de combustion du mélange réactif (taux de dilatation thermique, vitesse de propagation de la flamme...) mais également de la géométrie de l'installation dans laquelle elle se développe.

Dans les "enceintes" isolées, la vitesse de propagation de la flamme est suffisamment faible (< 30 m/s) pour que la pression interne reste uniforme (dans l'espace). Cette condition est très généralement satisfaite lorsque le rapport entre la plus grande et la plus petite dimension de l'appareil est plus petit que 5 ($L/D < 5$) et que la plus grande dimension est inférieure à 20 m. Dans ce cas, la surpression maximale d'explosion P_{\max} ne dépend que de la quantité volumique de gaz de combustion produits : elle ne peut pas excéder 12 à 13 bars (enceinte parfaitement close) et dépend exclusivement de la nature du produit pulvérulent (et plus particulièrement de son pouvoir calorifique).

Dans les volumes allongés comme les très hautes cellules, dans les galeries longues et dans les canalisations de transport pneumatique ou de dépoussiérage, le déroulement de l'explosion peut être très violent et conduire à des vitesses de flammes de plusieurs centaines de m/s.

Les conséquences à l'intérieur d'un appareil ou d'un bâtiment d'une explosion sont l'augmentation de pression et la propagation d'une flamme suite à l'amorçage de la combustion d'un nuage de poussières inflammables. S'ils ne sont pas dimensionnés correctement alors ils se fracturent et des fragments sont formés puis projetés dans l'environnement souvent à grande vitesse. La surpression et la flamme, jusqu'alors confinées à l'intérieur, sont libérées et peuvent

produire des effets dans les bâtiments ou les équipements reliés à celui où a été amorcée l'explosion.

V-6-3. PROPAGATION DE L'EXPLOSION

Dans le cas de bâtiments connectés notamment par des galeries ou d'appareils connectés par des canalisations, une explosion de poussières va se développer dans une configuration de type "enceintes interconnectées" avec d'importants écoulements de gaz, et donner lieu à des "coups de poussières" si des dépôts de poussières existent

V-6-4. DEROULEMENT D'UNE EXPLOSION DE POUSSIÈRES

Le déroulement d'une explosion est le suivant pour le cas des « enceintes » ; le cas des « Canalisations » étant quelque peu différentes :

V-6-4-1. ORIGINES DE DECLENCHEMENT DES EXPLOSIONS

(J.P. PINEAU, INERIS, EUROFORUM 1998) :

❖ 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 (20 kJ/g).

1. Surfaces chaudes

Si une atmosphère explosive, une couche de poussière ou un solide combustible vient en contact avec une surface chauffée, l'inflammation peut se produire. Il n'y a pas qu'une surface chaude qui puisse agir comme une source d'inflammation, car une couche de poussière ou un solide combustible en contact avec une surface chaude et enflammé par celle-ci peut aussi agir comme une source d'inflammation pour une atmosphère explosive. 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, ...

Les élévations de température dues à des réactions chimiques doivent aussi être prises en considération.

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.

Remarque : Un dépôt de poussières sur une surface chaude s'enflammera à une température d'autant plus faible que son épaisseur est importante.

2. Flamme et gaz chauds (incluant les particules chaudes)

Les flammes sont associées aux réactions de combustion à des températures supérieures à 1000°C. Des gaz chauds sont obtenus comme produits de réaction et, dans le cas de flammes de

particules solides ou de flammes contenant des suies, des particules incandescentes sont aussi produites. Les flammes, leurs produits chauds de réaction et les gaz chauffés à haute température peuvent enflammer une atmosphère explosive, des produits pulvérulents en dépôt. Les flammes, même de faibles dimensions, sont parmi les sources d'inflammation les plus actives.

Les perles de soudure qui se produisent lors des opérations de soudage ou de découpage sont des étincelles de très large surface et, de ce fait, sont aussi parmi les sources d'inflammation les plus actives.

3. Etincelles d'origine mécanique

Par suite des processus de friction, de choc et d'abrasion tels que le broyage, des particules chauffées peuvent se séparer des matériaux solides. Si ces particules se composent de substances oxydables, par exemple le fer ou l'acier, elles peuvent subir un processus d'oxydation et atteignent ainsi des températures plus élevées. Ces particules (étincelles) peuvent enflammer les gaz et vapeurs combustibles et certains mélanges poussières/air (spécialement les mélanges poussières métalliques/air). Dans la poussière en dépôt, un feu couvant peut être déclenché par des étincelles et ceci peut constituer une source d'inflammation d'une atmosphère explosive.

Dans les appareils, l'entrée de matériaux étrangers, par exemple pierres ou morceaux de métal, capables de donner des étincelles, doit être pris en compte.

4- Matériel électrique

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 par suite de courants vagabonds ;
- Ou du fait de connexions desserrées.

On fait remarquer explicitement que la très basse tension (TBT par exemple inférieure à 50 V) est conçue pour la protection des personnes contre les chocs électriques et ne constitue pas une mesure visant la protection contre l'explosion. Ainsi, des tensions inférieures à 50 V peuvent encore produire des énergies suffisantes pour enflammer une atmosphère explosive. Des matériels adaptés sont à choisir en fonction des zones dangereuses définies.

5. Courants "vagabonds"

Les courants "vagabonds" peuvent s'écouler entre systèmes électriquement conducteurs ou parties de ces systèmes :

- Sous forme de courants de retour dans les installations de génération de puissance, par exemple à proximité d'installations de soudure importante,
- En raison d'un court-circuit ou d'une mise accidentelle à la terre par suite de défauts dans les installations électriques,

- Par suite de l'induction magnétique, par exemple près des installations électriques où existent des courants et des radiofréquences élevées,
- Par suite de la foudre,

Si les parties d'un système capable de conduire les courants vagabonds sont déconnectées, connectées ou pontées même dans le cas de faibles différences de potentiel ; une atmosphère explosive peut être enflammée par suite de la formation d'étincelles électriques et / ou d'arcs. De plus, l'inflammation peut aussi se produire par suite du chauffage dû au courant circulant dans le circuit.

6. Electricité 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. Avec des parties chargées de matériaux non-conducteurs, ce qui inclut la plupart des matières plastiques, aussi bien que d'autres matériaux, des décharges sont possibles. De plus, les dépôts de produits granulaires peuvent se charger et conduire à des décharges électrostatiques.

Le risque est à caractériser au cas par cas en tenant compte de l'énergie minimale d'inflammation des poussières.

Le processus de développement des décharges électrostatiques est le suivant :

- Création de charges électriques entre deux surfaces en contact ;
- Séparation ou accumulation des charges ;
- Neutralisation des charges à la terre ou ionisation disruptive de l'air en l'absence de liaisons à la masse.

Le niveau de charge électrostatique que peut accumuler un produit pulvérulent dépend de nombreux paramètres, principalement du type de transfert auquel il est soumis, mais aussi de la nature du produit et de sa granulométrie, de la nature des matériaux avec lesquels il est en contact, etc.

7. Foudre

L'inflammation par la foudre peut survenir de plusieurs manières.

▪ **Effets directs** : Lorsque la foudre éclate dans un environnement où une atmosphère explosive existe, l'inflammation peut intervenir. De plus, il existe aussi une possibilité d'inflammation due à la température élevée atteinte par les conducteurs de foudre, ou aux étincelles générées par les courants importants qui s'y écoulent ;

▪ **Effets indirects** : Même en l'absence d'impact direct du coup de foudre, les orages peuvent induire des tensions importantes dans les appareils, équipements de protection et composants.

8. Ondes électromagnétiques

Des ondes électromagnétiques sont émises à partir de tous les systèmes qui produisent et utilisent des énergies électriques notamment par haute fréquence (émetteurs radio, téléphoniques...).

Toutes les parties conductrices situées dans le champ électromagnétique se comportent comme des antennes réceptrices. Si le champ est suffisamment puissant et si l'antenne a des dimensions suffisantes, ces parties conductrices peuvent entraîner l'inflammation d'atmosphères explosives.

9. Rayonnement lumineux

Dans certaines conditions, le rayonnement de sources lumineuses intenses est absorbé si fortement par les particules de poussières, que celles-ci deviennent des sources d'inflammation pour les atmosphères explosives ou pour les dépôts de poussières.

Avec un rayonnement laser, même à grandes distances, l'énergie ou la densité puissance d'un faisceau, même non concentré peut être assez élevée pour conduire à l'inflammation d'atmosphères explosives ou de dépôts de poussières.

Le processus du chauffage se produit principalement quand le faisceau laser atteint la surface d'un corps solide ou quand il est absorbé par les particules de poussières en suspension.

10. Rayonnement ionisant

Le rayonnement ionisant produit, par exemple à partir de tubes de rayons X et des substances radioactives, peut enflammer des atmosphères explosives (spécialement les atmosphères explosives contenant des particules de poussières) du fait de l'absorption d'énergie. De plus, la source radioactive elle-même peut chauffer le milieu en raison d'absorption interne de l'énergie du rayonnement à un niveau tel que la température d'inflammation de l'atmosphère explosive qui l'entoure est dépassée.

Le rayonnement ionisant peut induire une décomposition chimique ou d'autres réactions qui peuvent conduire à la formation de radicaux très réactifs et de composés chimiques instables. Ceci peut entraîner l'inflammation.

11. Ultrasons

Quand des ondes ultrasoniques sont employées, une grande quantité d'énergie émise par l'émetteur électroacoustique est absorbée par les substances solides ou liquides. En conséquence, la substance exposée aux ultrasons s'échauffe de telle sorte que, dans des cas extrêmes, l'inflammation peut se produire.

12. Auto-échauffement

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 (s'il s'agit d'un combustible). Le phénomène d'oxydation se produira d'autant mieux lorsque le produit est chauffé dans les processus de broyage, séchage, etc...

A température ambiante, la vitesse des réactions d'oxydation est souvent faible, mais d'autres sources de chaleur peuvent jouer le rôle "d'allumette" comme la fermentation aérobie ou anaérobie pour les produits agro-alimentaires, fermentation plus ou moins favorisée par la présence d'un excès d'eau.

Au total, les phénomènes d'auto-échauffements sont relativement compliqués et font intervenir en dehors de l'oxydation et des fermentations, les conditions générales de stockage principalement la taille.

La température n'augmente à l'intérieur du stockage que si la chaleur produite est supérieure à la chaleur que l'on peut dissiper dans les conditions établies. On définit :

- Tc, la température critique d'auto-inflammation du dépôt ou tas de produit de volume donné, comme la température la plus basse pour laquelle les phénomènes d'auto-échauffement conduisent à une élévation de température conduisant à une inflammation du produit,
- D, la dimension du stockage, comme la distance minimale du centre du stockage à un de ses bords. Par exemple, dans un silo à base circulaire, la dimension du stockage correspond au rayon ; dans un silo à base carrée, la dimension du stockage correspond à la demi-arrête,
- Dc, la dimension critique, pour un produit et une température initiale donnée, comme la dimension la plus faible pour laquelle les phénomènes d'auto-échauffement conduisent à une inflammation du produit.

❖ **PROPAGATION**

Ces particules en combustion (de 1 000 à 2 000°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 (d'un facteur de l'ordre de 5 à 10).

❖ **EXPLOSION**

Dans le cas des explosions de poussières, 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.

On peut également citer, comme incident lié aux poussières, l'incendie de poussières en couche. En effet, ces fines particules sont susceptibles de brûler, créant un feu couvant et dégageant peu de calories. Le principal danger lié à un incendie de poussière en couche est donc la création et l'inflammation d'un nuage de poussières pouvant provoquer une explosion.

• **Conditions nécessaires**

Conditions d'explosion (hexagone de l'explosion)

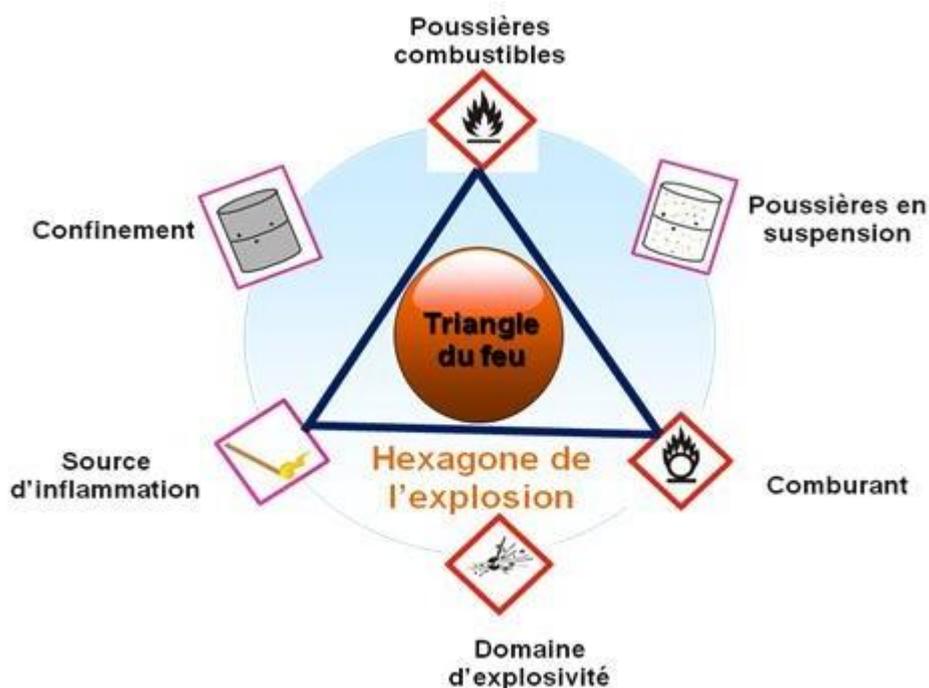


Figure V.4 : Hexagone de l'explosion

V-6-4-2. CONDITIONS NECESSAIRES POUR L'EXPLOSION

Six conditions à réunir décrites ci-dessous

V-6-5-1. PRESENCE D'OXYGENE

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.

V-6-5-2. POUSSIÈRES COMBUSTIBLES

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

V-6-5-3. 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 μm , 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.

V-6-5-4. 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.

SOURCE D'INFLAMMATION

Une source d'inflammation suffisante peut permettre l'allumage du nuage explosible (suspension de particules inflammables dans l'air à une concentration permettant la propagation de la combustion). Divers phénomènes sont susceptibles de provoquer une inflammation. L'aptitude de ces phénomènes à induire une inflammation dépend des particules combustibles. Cette aptitude est donnée par la température d'auto-inflammation (TAI).

V-6-5-6. CONFINEMENT

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

Un volume partiellement clos peut parfois suffire au déroulement d'une explosion, dans des cas particuliers de dimensions ($H/D > 2$).

L'explosion est un phénomène pouvant entraîner un éclatement de structure suite à une augmentation de pression dans une enceinte close.

Pour que l'explosion se produise et que ses conséquences soient importantes, il est nécessaire que la surpression interne d'une enceinte atteigne la valeur de destruction des structures.

Remarque Important : Granulométrie :

- Plus les poussières sont fines, plus faible est la vitesse de chute: elles restent donc en suspension plus longtemps. Ce paramètre a donc une influence directe sur la mise en suspension qui est une des conditions de déclenchement d'une explosion de poussières ;
- Plus les poussières sont fines, plus l'énergie minimale d'inflammation et la concentration minimale d'inflammation sont faibles ;
- Plus les poussières sont fines, plus la pression maximale d'explosion et la vitesse maximale de montée en pression sont importantes.

V-6-4-3. TYPES D'EXPLOSIONS DE POUSSIÈRES

Deux types d'explosions de poussières sont à distinguer

• **L'explosion primaire** : Il s'agit de l'explosion initiale à la suite de l'inflammation d'un nuage de poussières.

• **L'explosion secondaire** : Cette (ou ces) explosion(s) se déclenche(nt) par la propagation du front de flamme, dans une atmosphère explosive créée par la mise en suspension du dépôt de poussières, par l'action de l'onde de pression provenant de l'explosion précédente.

▪ **Déroulement d'une explosion de poussières secondaire**

Une explosion est dite primaire lorsqu'elle prend naissance dans l'équipement considéré.

L'explosion peut se propager dans des équipements dans lesquels de la poussière est présente sous la forme d'un nuage explosible. On parle ainsi d'explosion secondaire lorsqu'une explosion, dans une enceinte B, est provoquée par une explosion primaire dans une enceinte A.

Une explosion secondaire peut être beaucoup plus violente que l'explosion primaire qui l'a provoquée. En effet, l'explosion primaire génère de fortes turbulences et des conditions de pression initiales beaucoup plus élevées dans l'enceinte qui sera le siège de l'explosion secondaire.

Une explosion peut également se propager par mise en suspension de dépôts de poussière. Si le dépôt de poussière est peu important, l'explosion se propage sans renforcement de la pression ; cette propagation prend la forme « Flash Fire ». Si le dépôt de poussière est suffisamment important pour créer un nuage explosible dans tout le volume de l'enceinte, une explosion secondaire a lieu.

Sous certaines conditions, il est possible de considérer qu'il n'y a pas d'augmentation de la violence d'une explosion secondaire. Par exemple, si une enceinte est dotée d'un évent en hauteur et d'une petite surface fragile sur ses parois, l'explosion sera déchargée en hauteur, ce qui permettra une détente de pression, mais une flamme peut tout de même se transmettre à une enceinte voisine par la surface fragile longitudinale.

V-6-4-4. CONSEQUENCES D'UNE EXPLOSION

A .Effets dynamiques

Les effets dynamiques résultent de la surpression produite. Ils peuvent engendrer :

- Des dommages corporels aux hommes ;
- La destruction d'installations et la projection de projectiles pour les structures,

B.Effets sur l'homme

Ces risques proviennent de trois effets :

L'effet primaire : Résulte de l'action directe de l'onde de pression sur le corps humain. La plus grande partie de l'onde de pression est absorbée par l'organisme dans lequel elle se propage, et s'amortit en raison de l'hétérogénéité du corps en provoquant des lésions anatomiques.

Ces lésions se traduisent notamment par des éclatements des organes creux (contenant des gaz : oreille, poumon, estomac, ...) dus à la détente des gaz succédant à leur compression brutale.

La rupture des tympanes peut se produire pour des surpressions voisines de 400 mbar. Des lésions des poumons sont à craindre dès 1 bar.

L'effet secondaire : Résulte de l'impact sur le corps humain des projections d'objets ou fragments d'objets générées par l'explosion. L'effet dépend de l'énergie du projectile d'impact.

Les éclats et projections peuvent perforer l'organisme ou occasionner des traumatismes en l'absence de perforation.

L'effet tertiaire : Résulte du heurt du corps humain propulsé sur un obstacle. Tout comme les objets situés dans le voisinage du siège de l'explosion, le corps humain peut être soulevé et propulsé. Une surpression de 150 à 200 mbar est suffisante pour propulser un homme de corpulence moyenne.

Les seuils critiques présentés ci-dessous sont pris en référence dans les études de dangers.

C. Autres effets

Le flux thermique intense dégagé par une explosion de poussières malgré une vitesse de propagation de la flamme élevée et donc un temps d'exposition réduit, est susceptible d'entraîner dans la plupart des cas la mort des personnes exposées.

Une explosion de poussières, s'accompagne d'une production de monoxyde de carbone (CO).

V-7. MESURES DE PREVENTION DANS LES MINOTERIES ET SEMOULERIES

V-7-1. INTRODUCTION

Le process des grandes meuneries industrielles est fortement mécanisé et modernisé : La prévention collective résulte alors de l'utilisation de systèmes de fabrication capotés et automatisés et de dispositifs mécaniques comme l'extraction de poussières qui permettent de réduire l'exposition des travailleurs et de diminuer considérablement les risques physiques, chimiques et d'explosion ou d'incendie.

Le process d'un moulin en circuit totalement fermé minimise aussi beaucoup les possibilités de sources d'exposition allergène. Toutefois, des incidents dans l'automatisation des opérations, des fuites, des dysfonctionnements des asservissements... génèrent des dangers et nécessitent

également des interventions de maintenance qui restent dangereuses. Par ailleurs, dans les petites meuneries, les pratiques sécuritaires sont beaucoup moins mises en œuvre et maîtrisées.

Les ateliers des minoteries et semouleries doivent faire l'objet d'une analyse poussée des risques pour permettre la rédaction du Document Unique de Sécurité (Décret du 5 novembre 2001) en appréciant à la fois l'environnement matériel et technique (outils, machines, produits utilisés) et l'efficacité des moyens de protection existants et de leur utilisation selon les postes de travail.

Les analyses de risques sont confiées à des spécialistes de la sécurité au travail (hygiéniste, ingénieur sécurité). Les rapports d'intervention et de maintenance seront aussi intégrés à la documentation de sécurité au travail de l'entreprise et communiqués au médecin du travail et au CHSCT.

Les salariés doivent être aussi informés à propos des produits dangereux mis en œuvre et formés aux pratiques professionnelles sécuritaires. Les Fiches de Données de Sécurité (FDS), obligatoires pour tout produit chimique dangereux, comportent les renseignements relatifs à la toxicité des produits.

V-7-2. PREVENTION DES INCENDIES ET DES EXPLOSIONS / MAITRISE DE L'EMPOUSSIEREMENT

La prévention consiste à la fois à diminuer les diffusions et dépôts de poussières combustibles et éviter les sources de chaleur responsables de l'ignition : Il convient notamment de limiter les émissions de farine, d'utiliser des équipements électriques spécifiques dans les zones ATEX, et de vérifier les installations électriques...

Deux types de mesures sont possibles pour réduire les risques d'explosion et d'incendie

- Des mesures de prévention qui permettent de diminuer la probabilité de survenance d'un sinistre ;
- Des moyens de protection, si les mesures de prévention ne suffisent pas ou, sont impossibles à réaliser à un coût économiquement acceptable. La protection permet de diminuer les dommages d'un sinistre.[42]

V-7-2-1. MESURES DE PREVENTION

On peut regrouper les mesures de prévention en fonction des huit côtés de l'octogone de l'explosion de poussières :

1. REDUCTION DE LA FORMATION DE POUSSIÈRES.

La concentration minimale d'explosivité en meunerie ne doit pas être atteinte en évitant l'émission et l'accumulation de poussières d'une part, en disposant de systèmes de ventilation et d'aspiration d'autre part :

- Capoter les sources d'émission de poussières (par exemple jetées des élévateurs, mise sous aspiration des transporteurs, aspiration efficace des poussières au poste d'ensachage)

et relier ces capotages aux circuits de dépoussiérage. Les sources d'émissions de poussières sont fortement dépendantes de la maîtrise de l'étanchéité des installations ;

- Equiper toutes les installations d'un système d'aspiration fermé permettant le captage et la collecte des poussières avec asservissement de la marche des équipements à la marche des ventilateurs de dépoussiérage. La récupération des poussières se fait par un circuit de dépoussiérage largement dimensionné comportant des cyclones permettant la récupération des poussières très fines explosives et des filtres ;

- Diminuer des possibilités d'accumulation de poussières en évitant les surfaces planes inaccessibles et les aspérités des parois (surfaces lisses, rebouchage de tous les trous des sols et des murs...). Des installations conçues pour permettre facilement leur nettoyage et éviter toute zone de rétention de poussières est une mesure essentielle ;

- Réduire la mise en suspension des poussières dans l'air en limitant les hauteurs de chute de produits lors des transferts, en contrôlant périodiquement les attaches au niveau des manches... ;

- Nettoyer des locaux, toutes les installations électriques, à l'aide d'aspirateurs industriels utilisables en atmosphères explosives pour éliminer les dépôts de poussières rapidement après leur formation.

Pour se faire, on doit tenir compte de :

- La substitution de la matière pulvérulente combustible par une matière non combustible (difficile à réaliser) ;
- L'adition de substances inertes.

2. OXYDANT (COMBURANT)

Abaissement du taux d'oxygène (en dessous de 10 à 15%, en règle générale)

3. SOURCE D'INFLAMMATION

- Permis de feu pour tous travaux par points chauds
 - Interdiction de fumer
 - Encadrement et sensibilisation des sous-traitants
 - Vérification et maintenance des installations de manutention (contrôle visuel, par ultrasons ou par thermographie, éventuellement par un organisme extérieur)
 - Mise à la terre et en liaison équipotentielle des équipements métalliques
 - Limitation des frottements (à la conception et par la maintenance)
 - Installation d'appareils adaptés au classement des zones (catégories 1D, 2D et 3D)
- infrarouge)
- Humidification de l'atmosphère
 - Vérifications des installations électriques (notamment par thermographie
 - Transfilage (dans les silos de grains)
 - Moyens de surveillance et d'instrumentation
 - Utilisation d'outils antidéflagrants (Signalisation des zones)
 - Prise en compte du risque foudre.

4. MISE EN SUSPENSION

- Capotage des installations
- Aspiration des poussières au plus près de l'émission
- Procédure de nettoyage fréquent, par aspiration, avec traçabilité écrit
- Humidification de l'atmosphère
- Découpe sous déluge d'eau

5. CONFINEMENT

- Conception ouverte de l'installation (ex. remplissage des cales de navires céréaliers avec les panneaux de cale en position ouverte)

6. DOMAINE D'EXPLOSIVITE

- Ventilation des locaux, suffisante pour rester en deçà de la concentration minimale d'explosivité.

7. DIAMETRE DES POUSSIÈRES INFÉRIEUR A 500µM :

- Néant

8. HYGROMETRIE

- Néant

9. ELIMINATION DES SOURCES D'IGNITION

❖ *Vérification de la bonne marche et le bon état des matériels et des circuits électriques.*

En particulier, l'équipotentialité et la bonne mise à la terre de toutes les installations métalliques doivent être contrôlées, pour cela, il faut éviter toute accumulation d'électricité statique.

Les étincelles, arcs et échauffements provoqués par les moteurs et appareillages électriques en fonctionnement peuvent aussi déclencher la catastrophe.

Il convient d'utiliser de l'appareillage électrique conçu pour atmosphères dangereuses afin de prévenir que le matériel, y compris l'éclairage, soit à l'origine d'un incendie ou d'une explosion.

Une métallisation au moyen d'un matériel conducteur et une mise à la terre appropriée de l'équipement de traitement et de transport sont utiles pour dissiper et diriger à la terre en toute sécurité les charges électriques accumulées.

La protection contre les contacts avec les masses mises accidentellement sous tension est obtenue par un dispositif de coupure automatique en cas de défaut d'isolement.

Il est fortement recommandé de placer des explosimètres dans les zones de réception / manutention / stockage / expédition.

Dans le domaine des atmosphères explosives (ATEX), des normes européennes fixent le cadre de travail des industriels et des installateurs :

- Depuis juin 2003, tout nouveau site de type ATEX doit être équipé avec du matériel certifié, avec des enveloppes antidéflagrantes (disjoncteurs, dispositifs d'éclairage antidéflagrants).

- Les autres installations doivent, depuis juin 2006, avoir été mises à niveau :

- Prendre les précautions nécessaires lorsque des travaux de réparation ou de construction nécessitent des soudures, des découpages... c'est à dire uniquement dans le cadre d'une procédure de permis de feu ;

- Équiper les machines, les appareils de manutention et d'ensilage de systèmes de détection de dysfonctionnement susceptible de provoquer une élévation anormale de température : mise en œuvre d'une série de différents capteurs de bourrage, de détection de formation de tas, de température, de contrôleurs de rotation, de déport de bande... ;

- Interdictions de fumer parfaitement respectées.

V-7-2-2. AUTRES MESURES DE PREVENTION

1. RELATIVE A LA VENTILATION MECANIQUE

La ventilation mécanique générale doit assurer un renouvellement d'air en permanence par extraction et soufflage : L'air est transporté dans le local par un ventilateur de soufflage et extrait du local par un ventilateur d'évacuation. L'extraction de l'air se fait grâce à un système de collecte par ces ventilateurs et des gaines de diffusion, réseau de conduits jusqu'aux filtres et aux épurateurs dans l'installation d'air soufflé qui permettent de nettoyer l'air, puis de l'évacuer à l'extérieur par rejet dans l'atmosphère (les aires de chargement et de déchargement, sans système d'aspiration localisé, sont particulièrement concernées par une ventilation forcée efficace).

Les composants aérauliques comme les ventilateurs, les conduits doivent être accessibles et faciles d'entretien et de nettoyage. En particulier, les réseaux s'encrassent rapidement avec de filtres hors d'usage, une évacuation des condensats obstruée... L'entretien régulier du système de ventilation (nettoyage des conduits d'extraction, changement des filtres) est une condition indispensable de bon fonctionnement.

Par ailleurs, ces mesures préventives de réduction de l'empoussièrement diminuent les multiples risques respiratoires que présentent les fines poussières de farine et de céréales, en limitant leur concentration dans l'air ambiant et en les évacuant des lieux de travail, de façon à respecter les valeurs limites d'exposition professionnelle et éviter ainsi les conséquences néfastes sur la santé des travailleurs.

Pour mesurer l'efficacité des installations de ventilation, la mesure périodique des gaz (dont le CO et le NO₂) par prélèvements d'atmosphère et analyses des poussières est importante : Contrôles réguliers et fréquents ou, mieux, contrôle permanent complété par un système d'alarme automatique.

La norme EN 481 concerne l'échantillonnage de poussières sur les lieux de travail et donne les caractéristiques des instruments à utiliser pour déterminer les concentrations.

Les mesures et analyses peuvent être faites par l'employeur ou par un laboratoire extérieur et le respect des valeurs limites doit être vérifié au moins annuellement.

Si la valeur limite d'exposition est dépassée, cela permet d'imposer un arrêt temporaire d'activité pour remédier à la situation, puis il faut réaliser un nouveau contrôle sans délai. Ces rapports d'analyses métrologiques, d'intervention et de maintenance seront intégrés à la documentation de sécurité au travail de l'entreprise (Document Unique de Sécurité).

2- RELATIVE A L'ENTRETIEN DES LOCAUX

Une bonne tenue des sols des locaux par aspiration ou par un procédé à l'humide (jet d'eau ou système eau/vapeur), est essentielle pour éviter l'accumulation de déversements et de poussières sous ou autour des machines. Les déversements peuvent créer un danger de glissement et par conséquent doivent être nettoyés immédiatement.

Des mesures complémentaires d'hygiène des locaux doivent être mises en œuvre tel le nettoyage régulier des machines et des parois de l'atelier à l'aide d'un aspirateur industriel adapté avec un filtre absolu pour les particules (HEPA) qui ne disperse pas les poussières dans l'air (pas de soufflette à l'air comprimé, ni balayage).

3-RELATIVE AUX PREMIERS SECOURS

Les consignes en cas d'accident (n° d'appel d'urgence, conduite à tenir, identification des services de secours) doivent être visiblement affichées.

Une trousse contenant le matériel de premiers secours non périmé doit être mise à la disposition du personnel, toute blessure cutanée doit immédiatement être désinfectée et pansée.

Des extincteurs doivent être disponibles en nombre suffisant et vérifiés annuellement

4- RELATIVE A LA SURVEILLANCE MEDICALE

Pour les travailleurs exposés à la poussière, il faut réaliser des visites médicales régulières :

- Tests respiratoires (spiromètre) à l'embauche pour détecter une déficience des fonctions pulmonaires et tous les 2 ans pour dépister l'apparition des troubles respiratoires ;
- Radiographie thoracique si nécessaire.

V-7-3. MOYENS DE PROTECTION

Les différents moyens de protection sont, entre autres : Moyens de protection Les différents moyens de protection sont, entre autres :

- Les systèmes de détection automatique d'incendie et d'étincelle
- Les moyens de surveillance, d'instrumentation et de pilotage de l'installation
- Les dispositifs de suppression (extinction automatique et quasi-immédiate)

- La résistance à la pression d'explosion :
 - Autour de la source d'explosion : stockage renforcé
 - De la cible : salle de contrôle-commande durcie

- La décharge de la pression d'explosion (protection par évènement) par :
 - Couvertures légères
 - Membranes d'explosion (pièce de rupture)
 - Clapets de décharge d'explosion (fermeture automatique après décharge)
 - Systèmes de décharges d'explosion sans flamme.

- Les systèmes de découplage (arrêtant la transmission des effets de l'explosion à d'autres parties de l'installation) :
 - Isolement physique des différentes parties de l'installation (notamment entre la tour de manutention et la galerie sur cellules des silos)
 - Vanne guillotine à fermeture ultra-rapide
 - Engorgement sur un transporteur à vis
 - Ecluse rotative
 - Vanne d'obturation à fermeture automatique
 - Barrière d'agent extincteur
 - Cheminées de dégagement

- La protection par éloignement et séparation :
 - Eloignement des postes de travail des installations à risques d'explosion
 - Construction du bâtiment permettant l'explosion d'un silo sans ruine du bâtiment
 - Séparation des zones à risque d'explosion des zones ne présentant pas ce risque
 - Ecrans et filets de protection
 - Portes résistantes aux explosions
 - Mise en place de verres armés, à l'intérieur du rayon d'effets correspondant au bris de vitre (20mbars).

- Les moyens de secours
 - Extincteurs
 - Robinets d'incendie armés (RIA) : privilégier les RIA à diffuseur mixte haute tension (DMFA/HT) pour éviter toute mise en suspension par un jet baton.
 - Colonnes sèches

- Des mesures organisationnelles :
 - Consignes et plans d'évacuation
 - Procédures d'accès du personnel aux installations
 - Procédures en cas d'incident/accident
 - Procédures de conduite et de maintenance de l'installation plans de prévention.

Pour l'intervention d'entreprises extérieures procédures d'inertage procédures d'intervention en cas d'auto-échauffement, établies en lien avec les services de secours Instrumentation de silos de noir minéral, avec procédure d'inertage et cadres de bouteilles d'azote à cet effet Remarque : La formation du personnel à la connaissance des risques est à la fois une mesure de prévention et un moyen de protection.

La sensibilisation des travailleurs est primordiale et permet d'agir sur plusieurs paramètres simultanément.

Elle reste l'élément fondamental de la prévention, donc de la sécurité

V-8. CONCLUSION

Des explosions, des incendies se produisent chaque année dans les industries agro-alimentaires.

Les accidents industriels en résultant peuvent avoir des conséquences pour le personnel et les installations d'un site industriel, mais également pour son environnement proche.

Les risques d'incendie et d'explosion en termes d'occurrence et de dommages dépendent aussi bien des produits stockés que des installations (appareils et bâtiments).

Cependant, il est important de souligner que, pour un même produit générique, les caractéristiques d'inflammabilité et d'explosivité vont varier, notamment en fonction de la nature, de la granulométrie et de l'humidité de la poussière.

Au plan des installations, les risques sont plus ou moins élevés selon le type d'appareil et la nature des matériaux des éléments constitutifs

Les conditions d'exploitation de ces installations (maintenance, compétence du personnel, ...) et la sensibilisation du personnel aux risques ont aussi une incidence pour réduire les risques d'incendie et d'explosion.

Une analyse des risques réalisée au stade de la conception d'un nouveau complexe de stockage, ou en cours d'exploitation d'un site de stockage existant est la plus à même de pouvoir permettre à un industriel de déterminer les situations dangereuses auxquelles il pourra être confronté, et de choisir les dispositions propres à éviter des accidents industriels et à en réduire les effets.

Soulignons que l'analyse des risques doit aussi prendre en compte les stockages de produits agro-pharmaceutiques, d'engrais, de gaz, ...

Parmi ces dispositions, les mesures préventives sur les accumulations de matières dangereuses (poussières inflammables, produits combustibles) et sur les sources d'inflammation sont essentielles car elles visent à l'élimination des facteurs conduisant à l'accident.

Malgré une prévention adaptée, un accident industriel est toujours possible et des mesures de protection efficaces doivent également être adoptées.

Il faut souligner enfin, le rôle important que peuvent tenir actuellement les organismes d'assurance dans la promotion d'actions en faveur de l'amélioration de la sécurité en complément de l'évolution du cadre réglementaire.

CHAPITRE VI : ETUDE D'UN CAS : EXPLOSION D'UN SILO DE CEREALES A BLAYE (ENJUILLET 1998)

VI-1. HISTORIQUE DE L'ACCIDENT

Le mercredi 20 août 1997, un accident survenait au sein des installations de stockage de céréales de la Société d'Exploitation Maritime Blayaise (SEMABLA), à Blaye (département de la Gironde). Cet accident a affecté principalement un silo vertical de stockages de céréales. L'effondrement d'une grande partie de cette installation, notamment sur des locaux administratifs et techniques, a fait 12 victimes (11 morts et 1 blessé).

Dans le cadre de l'enquête administrative inhérente à tout accident de ce type, l'INERIS (Institut national de l'environnement industriel et des risques) a été chargé par le ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement de produire une expertise en appui de la DRIRE (Direction Régionale de l'Industrie, de la Recherche et de l'environnement) Aquitaine.

Pour mémoire, le rapport INERIS relatif à cette expertise, intitulé « Explosion d'un silo à céréales - Blaye (33) », est daté du 27/04/1998.

Le présent document constitue une synthèse de l'analyse de cet accident. Il se présente ainsi :

- Principales caractéristiques des installations de la SEMABLA (chapitre 1) ;
- Dommages observés et constats (chapitre 2) ;
- Scénarios envisageables, recherche des causes (chapitre 3) ;
 - Enseignements issus de l'analyse de l'accident de Blaye (chapitre 4).

VI-2. PRINCIPALES CARACTERISTIQUES DES INSTALLATIONS VI-

2-1. SITE SEMABLA ET SON ENVIRONNEMENT

Les installations de la SEMABLA sont implantées sur le domaine portuaire de la commune de Blaye, situé sur la rive droite de l'estuaire de la Gironde, à une cinquantaine de kilomètres au nord-ouest de Bordeaux. Il s'agissait de l'un des plus importants complexes de stockage de céréales du département de la Gironde.

La capacité totale de stockage était d'environ 130 000 tonnes de céréales, 90 000 tonnes en stockage à plat dans des hangars et 40 000 tonnes en silo vertical.

Sur ce même domaine portuaire, la SCREG (Société Chimique Routière et d'Entreprise Générale) dispose de bacs de stockage qui contiennent notamment de la soude caustique, de l'huile aromatique et de la mélasse. En termes d'éloignement vis-à-vis du silo vertical, la limite de propriété de la SCREG, matérialisée par une murette, se situait à 25 m des cellules, le bac le plus proche à environ 40 m et les bâtiments administratifs à quelques 210 m.

Par ailleurs, les premières habitations se situaient à environ 230 m du silo.

VI-2-2. DESCRIPTION DES INSTALLATIONS DE LA SEMABLA

La société SEMABLA a comme principale activité la manutention et le stockage des céréales destinées à l'exportation maritime, la réception étant assurée par camions de façon quasi exclusive. Elle disposait, pour ce faire, d'un silo vertical et de magasins de stockage à plat (hangars à ossature métallique).

Le silo vertical comportait notamment un ensemble compact constitué de 3 rangées de cellules de section circulaire, en béton armé. Le nombre total de ces cellules était de 44. La capacité totale de stockage de cet ensemble était de 47 240 m³, soit environ 37 200 tonnes en blé.

Deux appendices verticaux en béton, qui culminaient à environ 53 m au-dessus du niveau du sol, étaient disposés à chaque extrémité du silo. L'appendice nord était la partie sommitale de la tour de manutention de ce silo. L'appendice sud, quant à lui, était installé au sommet des cellules de l'extrémité sud du silo. Il abritait principalement un calibreur et un ensemble de deux nettoyeurs-séparateurs. Ces deux appendices étaient reliés par une galerie sur-cellules, à parois béton. En partie basse, l'ensemble des fûts des cellules sous musoirs constituait l'espace sous-cellules.

Une tour d'ossature métallique abritant des séchoirs à maïs se trouvait au sud du silo vertical, à quelques mètres des dernières cellules.

Le stockage de céréales pouvait se faire également dans différents hangars à charpente métallique répartis sur le site. Un de ces hangars (hangar FGH) était relié au silo vertical. La liaison avait été mécanisée avec la mise en place, notamment, de deux transporteurs à bande (repérés TB5 et TB6) fonctionnant dans les deux sens.

Un abri, construit au pied des cellules verticales du silo, côté Gironde, abritait des opérations d'ensachage, spécialité de ce site (envois notamment dans le cadre d'opérations humanitaires).

Les locaux administratifs et techniques, qui abritaient notamment la salle de contrôle, étaient situés au nord, en grande partie dans le prolongement des cellules de stockage et de la tour de manutention nord.

L'implantation des différents bâtiments et installations mentionnés précédemment (silo vertical, hangars,...) est représentée sur la figure .1.

Sur le site de Blaye, la SEMABLA disposait d'un effectif de 21 personnes attachées au fonctionnement des installations.



Figure VI.1 : Vue du silo vertical avant l'accident

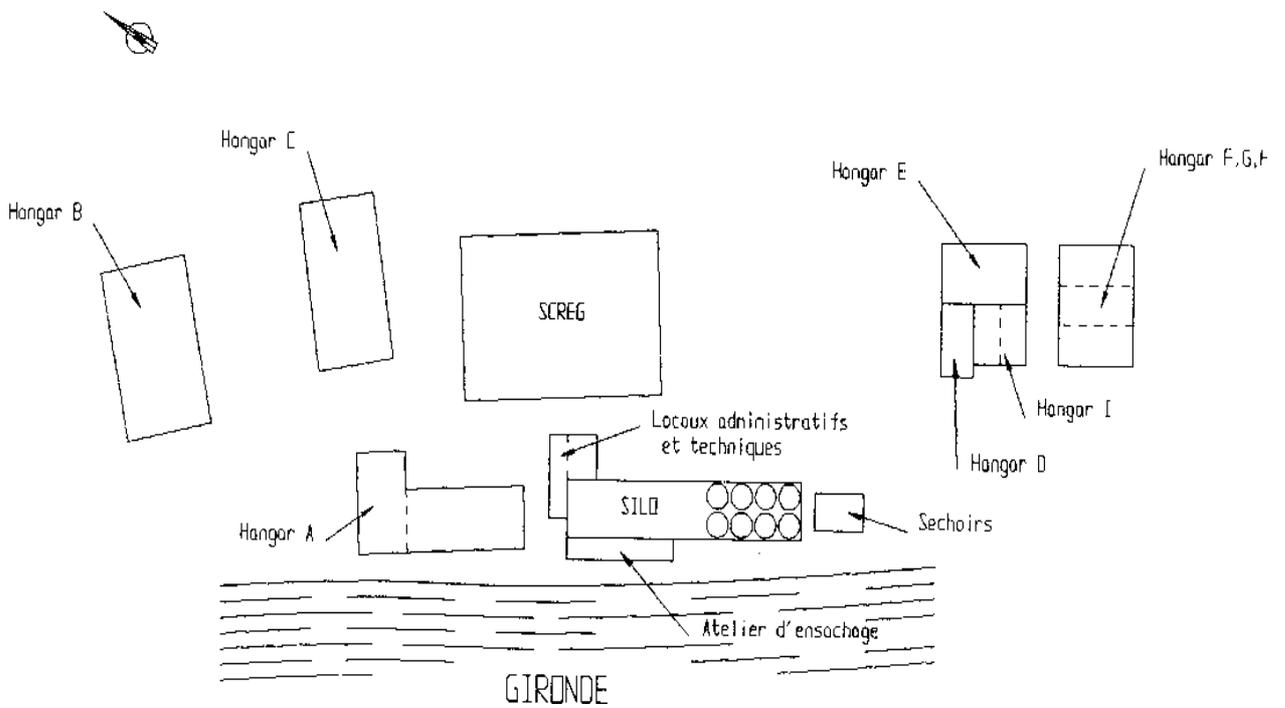


Figure VI. 2 : Schéma d'implantation des différents bâtiments et installations (Schéma non à l'échelle)

VI-2-3. DESCRIPTION DU SILO VERTICAL

Ce silo était composé de deux ensembles d'unités de stockage verticales, construits successivement à quatre années d'intervalle dans les années 70. Ces deux ensembles formaient un volume compact d'environ 100 m de long, 20 m de large et 40 m de haut.

Chaque ensemble d'unités de stockage, communément appelé « tranche », était constitué de cellules verticales en béton de section circulaire accolées sur trois rangées. Elles avaient un diamètre intérieur de 6,20 m et présentaient une hauteur totale de stockage de l'ordre de 33 m en moyenne. Les 2 files de parties vides entre les parois des cellules formaient des unités de stockage appelées boisseaux intercalaires. Ils offraient une hauteur totale pour le stockage de l'ordre de 32 m en moyenne et disposaient d'une plus grande dimension diamétrale intérieure d'environ 4,20 m.

La première tranche était constituée de 20 cellules et de 12 boisseaux intercalaires. Elle offrait un volume de stockage total de 20 904 m³. La seconde tranche, quant à elle, comportait 24 cellules et 14 boisseaux intercalaires pour un volume de stockage total de 26 336 m³.

Les deux boisseaux intercalaires situés à la jonction des deux tranches n'étaient pas utilisés pour le stockage de céréales ; ils étaient ouverts, en partie basse, sur l'espace sous-cellules mais obturés, en partie haute, par le plancher de la galerie sur-cellules.

Le schéma reporté en figure(VI.3) ci-après présente une vue en coupe de l'ensemble du silo et permet de visualiser notamment le repérage mis en place par la SEMABLA pour les cellules et les boisseaux intercalaires.

Les cellules de la seconde tranche se distinguaient de celles de la première tranche par le fait qu'elles pouvaient être ventilées par injection d'air en pied de cellule, qu'elles étaient équipées d'un extracteur d'air en partie haute (à l'exception toutefois de trois cellules situées à l'extrémité sud du silo) et qu'elles disposaient d'une vanne de vidange à commande pneumatique, en plus de celle à commande manuelle.

La réception des céréales en vrac se faisait par l'intermédiaire de deux fosses accolées. Une galerie enterrée, abritant des transporteurs à chaîne, assurait la liaison entre ces fosses de réception et la fosse des élévateurs, infrastructure d La tour de manutention nord se situait dans la continuité des cellules verticales et son architecture s'appuyait en partie sur ces dernières. Cette tour abritait notamment des moyens de manutention verticale des céréales (élévateurs à godets) et des éléments du circuit central de dépoussiérage (ventilateur, groupe filtrant et réserve à poussières). Il convient de noter que les passages pour le matériel réalisés dans les différents planchers pouvaient mettre en communication les différents étages de cette tour et que celle-ci communiquait directement avec la galerie sur cellules, en partie haute, et avec l'espace sous-cellules, en partie basse.

La tour de manutention nord se situait dans la continuité des cellules verticales et son architecture s'appuyait en partie sur ces dernières. Cette tour abritait notamment des moyens de manutention verticale des céréales (élévateurs à godets) et des éléments du circuit central de dépoussiérage (ventilateur, groupe filtrant et réserve à poussières). Il convient de noter que les passages pour le matériel réalisés dans les différents planchers pouvaient mettre en communication les différents étages de cette tour et que celle-ci communiquait directement avec la galerie sur cellules, en partie haute, et avec l'espace sous-cellules, en partie basse.

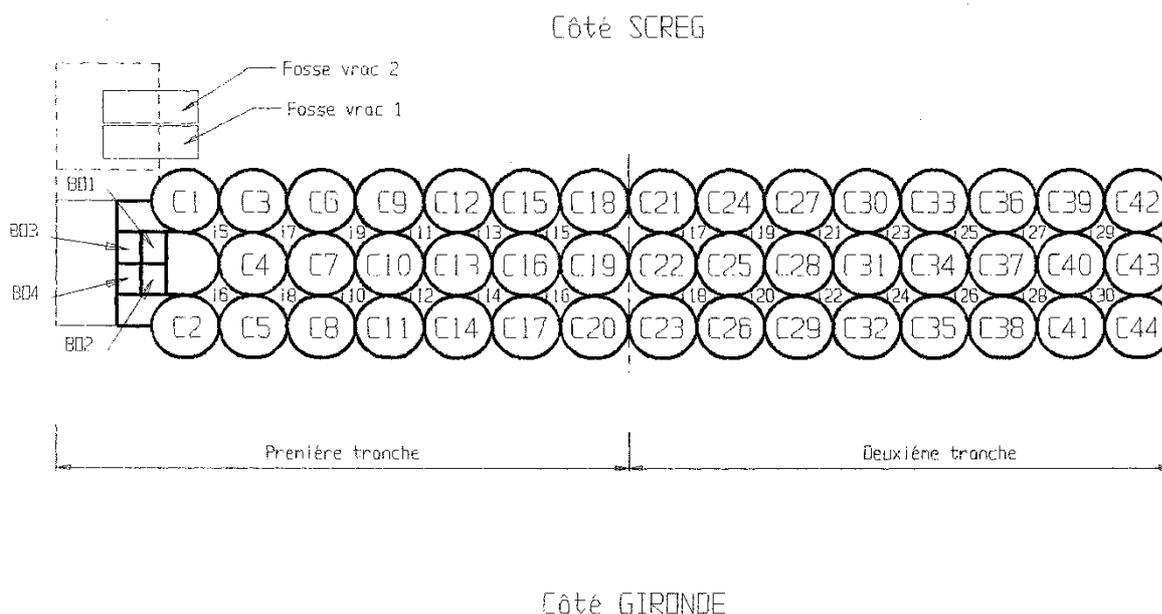


Figure VI.3 : Repérage des unités de stockage mis en place par la SEMABLA

La tour sud abritait notamment un ensemble de deux nettoyeurs-séparateurs et un calibreux, utilisés respectivement pour le maïs vert et l'orge.

La galerie sur-cellules reliait la tour sud et la tour de manutention nord. Elle abritait principalement des moyens de manutention horizontale des céréales, c'est-à-dire 4 bandes transporteuses dont 3 tapis d'ensilage et un de manutention assurant la liaison entre le silo vertical et le hangar FGH.

L'espace sous-cellules, non enterré, était constitué par l'ensemble des fûts des cellules sous musoirs. Cet espace abritait principalement les musoirs coniques des cellules, des moyens de manutention horizontale des céréales (transporteurs de reprise à chaîne communément appelés « redlers ») et les équipements du dispositif de soufflage d'air en pied des cellules de la deuxième tranche.

Le schéma reporté en figure 4 précise le positionnement des principaux équipements dédiés à la manutention des céréales. Ainsi, sur ce schéma sont représentés :

- Les transporteurs de reprise à chaîne situés dans l'espace sous-cellules (repérés de TR1 à TR10),

- Trois des quatre élévateurs à godets situés dans la tour de manutention (repérés de E1 à E3),
- Les élévateurs à godets disposés à l'extérieur du silo, en partie sud, et assurant notamment la liaison du silo vertical avec les installations de séchage ou le hangar FGH (élévateurs repérés E5, E6, E7 et E9),
- Les bandes transporteuses faisant partie de la liaison mécanisée avec le hangar FGH (repérées TB5 et TB6).

A l'intérieur du silo, le dépoussiérage était assuré de plusieurs manières et grâce notamment à un réseau centralisé. Ce réseau assurait une aspiration de l'air à plusieurs endroits du circuit des céréales au moyen d'un ventilateur situé en partie haute de la tour de manutention nord. La filtration était réalisée dans un filtre à manches non capoté, les poussières étant récupérées dans une réserve à poussières. Le ventilateur était situé en amont du filtre à manches.

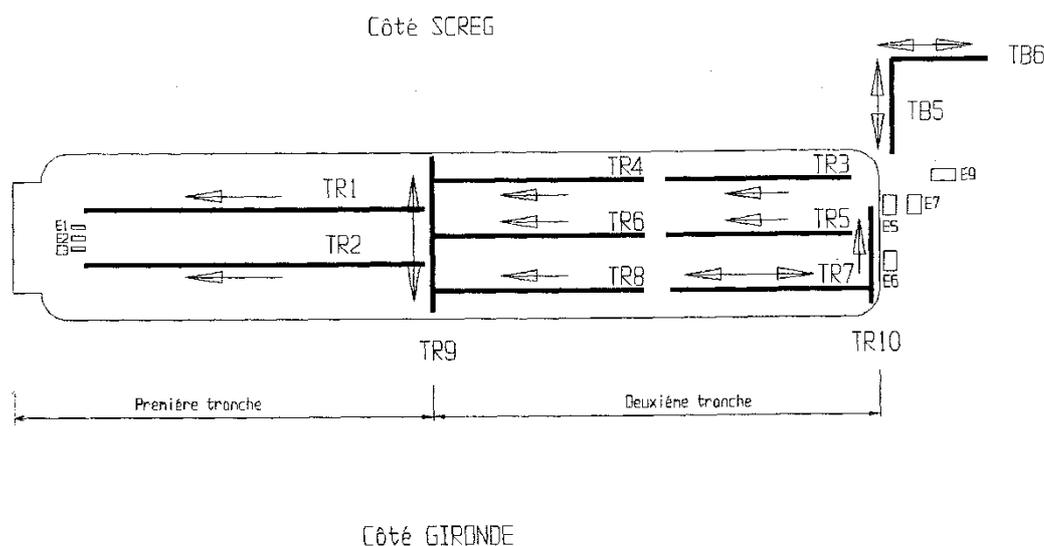


Figure VI.4 : Schéma de positionnement des principaux équipements dédiés à la manutention des céréales

Un système de scrutation automatique assurait un contrôle de la température dans toutes les cellules. Les boisseaux intercalaires n'étaient pas équipés de ce dispositif.

De façon générale, le silo n'était pas équipé de moyens de protection tels que des détecteurs d'incendie ou des événements d'explosion. De la même façon, il n'y avait pas de dispositif de détection et de collecte de corps étrangers, à la réception des produits, ni de dispositif magnétique permettant de recueillir tout élément métallique exogène ou endogène dans le circuit des céréales.

VI-3. DOMMAGES OBSERVÉS ET CONSTATS VI-

3-1. BILAN HUMAIN

Le bilan de l'accident s'établit à 11 morts et 1 blessé.

Parmi la liste des personnes décédées se trouvent sept employés de la société SEMABLA, trois personnes dont l'activité était liée à celle de la SEMABLA et un pêcheur.

Les corps de dix victimes ont été retrouvés dans les locaux administratifs et techniques implantés au pied du silo, ou à proximité immédiate de ceux-ci. Les personnes situées dans les locaux administratifs et techniques ont été retrouvées à leur poste de travail, apparemment sans avoir eu le temps de réagir à ce qui se passait. Ce point témoigne du caractère soudain de l'accident et de la probable absence d'événement précurseur ou d'une situation dégradée identifiée. Les corps des personnes situées à l'extérieur des locaux administratifs et techniques au moment de l'accident, à l'exception du pêcheur, présentaient des traces de brûlures légères. La onzième victime, le pêcheur, a été retrouvé plusieurs jours après les autres victimes, ensevelie sous les décombres, côté berges de la Gironde.

VI-3-2. DOMMAGES MATÉRIELS

VI-3-2-1. DOMMAGES AUX INSTALLATIONS SEMABLA

D'une manière 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, soit 9 en partie sud du silo et 7 en partie nord (ces chiffres correspondent au nombre de cellules qui ont conservé leur géométrie cylindrique sur au moins les deux tiers de leur hauteur initiale). Ainsi, une caractéristique de cet accident est d'avoir deux ensembles de cellules effondrées : un premier ensemble de cellules situé au nord et accolé à la tour de manutention ; un second ensemble de cellules dans la partie centrale du silo.

La tour de manutention nord, ainsi que les cellules immédiatement adjacentes, ont été quasi totalement détruites. Seule subsiste, sur environ la moitié de sa hauteur initiale, une partie du demi-voile courbe de l'architecture de cette tour, dont les parties latérales formant parois des boisseaux intercalaires adjacents (I5 et I6) ont été plaquées en arrière, sur le fût de la cellule C4. Ce constat témoigne d'une explosion au sein de la tour de manutention, explosion qui se serait produite après d'éventuelles explosions au sein des unités de stockages voisines.

La galerie sur-cellules a été totalement détruite.

La tour sud semble s'être affaissée sur le sommet des cellules. Des éléments des nettoyeurs-séparateurs (billes en caoutchouc des tamis) retrouvés calcinés en surface témoignent du passage d'une flamme ou de l'expansion de gaz brûlés dans cette tour.

En partie nord du silo, l'espace sous cellules (principalement constitué par le fût des cellules centrales) présente peu de traces pouvant attester du passage d'une flamme ou de l'expansion de gaz brûlés. En revanche, sous le bloc compact des 9 cellules encore en place dans la zone sud du silo, de nombreuses traces de combustion ont pu être observées (éléments en matière plastique fondus, dépôts de poussières calcinés...), notamment sous les cellules centrales (C34, C37 et C42). De plus, dans cette partie de l'installation, les gaines de soufflage d'air en pied de cellules ont été retrouvées disloquées, en grande majorité, avec une projection dans le sens nord-sud. Ceci a mis en évidence l'empoussiérement du circuit.

Aucune trace de combustion n'a pu être observée à l'intérieur de la fosse des élévateurs, des fosses de réception des céréales et de la galerie enterrée de liaison.

En ce qui concerne les moyens de manutention des céréales, les tambours d'entraînement des élévateurs situés dans la tour de manutention ne présentaient pas de traces de patinage, les axes de ces élévateurs ne semblaient pas bloqués dans leurs paliers, les morceaux de gaines métalliques retrouvés n'étaient ni gonflés ni éclatés et les tronçons de sangles à godets récupérés ne présentaient pas de traces de combustion. Les transporteurs de reprise situés dans l'espace sous-cellules ont été endommagés par l'effondrement des unités de stockage, tout particulièrement les transporteurs TR4, TR6, TR8 et TR9. De nombreux capots supérieurs des caissons abritant les transporteurs de reprise ont été soufflés. Dans la partie nord du silo (première tranche), le transporteur TR2 présentait des traces marquées de frottement en tête (partie menant) et de nombreuses ailettes de la chaîne de convoyage étaient manquantes.

De façon générale, des équipements de l'installation, notamment des éléments du circuit centralisé de dépoussiérage qui, pour certains, étaient de grandes dimensions, n'ont pas été retrouvés malgré les travaux de terrassement réalisés au lieu-dit « Naviplane » (lieu de dépose des décombres évacués lors des premières heures après le sinistre) et les opérations de dragage de la Gironde.

Par ailleurs, certaines installations situées à proximité du silo (hangars et installations de séchage) ont été endommagées à des degrés divers, principalement par la chute ou la projection d'éléments du silo.



Figure VI : Vue du silo vertical après l'explosion

VI-3-2-2. DOMMAGES AUX TIERS

Concernant les dommages aux tiers, la SCREG a subi les dommages les plus importants. De nombreux projectiles ont atteint différents bacs de stockage et des canalisations de transfert entre les bacs et l'apportement public ont été rompues.

Pour ce qui concerne les dégâts aux tiers extérieurs au site portuaire, il peut être retenu, de façon générale, des dommages aux habitations jusqu'à une distance de l'ordre de 500 m du silo, avec notamment des bris de vitres.

VI-3-2-3. AUTRES DOMMAGES

Les incendies constatés au niveau des unités de stockage, juste après l'accident, étaient situés en périphérie des unités encore partiellement en place. Dans les gravats, aucun amas de céréales incandescentes, chaudes ou brûlées qui aurait pu indiquer la présence d'un auto-échauffement préalable à l'accident n'a été retrouvé.

Par ailleurs, juste après le sinistre, un feu couvant a été constaté (fumerolles) dans une cellule fissurée, située au sud-est du silo (cellule C42). L'examen à la caméra thermique a révélé la présence d'une zone chaude sur quelques mètres de profondeur à partir du sommet de la cellule qui était pleine d'orge. Par la suite, un feu couvant a également été détecté dans deux autres cellules.

VI-3-3. PROJECTILES

De façon générale, des projectiles significatifs en taille (éléments métalliques, en béton ou en verre) ont pu être observés jusqu'à une centaine de mètres du silo, soit environ 2 fois la hauteur de la tour de manutention.

Lors de l'investigation faite, pour ce qui concerne les éléments en béton, des morceaux de dimensions métriques ont été retrouvés jusqu'à environ 50 m du silo et des débris de petites dimensions (de masse inférieure au kilogramme) ont été projetés, au maximum, jusqu'à environ 140 m des cellules.

VI-3-4. CONSTATS RELATIFS A L'ACTIVITÉ AU MOMENT DU SINISTRE

Au cours du déblaiement, un camion benne avec remorque a été retrouvé sur les fosses de réception. Cet ensemble venait décharger du maïs. La présence de cette céréale en fond d'un transporteur de liaison avec la fosse des élévateurs laisse supposer que cet ensemble avait commencé à vider son chargement dans la fosse de réception n°1 (soit la fosse la plus proche des locaux administratifs et techniques).

Par ailleurs, le camion précédent avait déchargé du blé dans la fosse de réception n°2 et venait de quitter le site de la SEMABLA. La présence d'un mélange d'orge et de blé dans un transporteur de liaison avec la fosse des élévateurs laisse supposer que celui-ci était vide au moment de l'accident et que l'opération de réception du blé était terminée.

Des constats effectués sur les transporteurs de reprise de l'espace sous-cellules, en perforant avec un espacement régulier le bas du caisson lorsque celui-ci était rempli de céréales, indiquent qu'éventuellement seuls les transporteurs à chaîne TR1 et TR2 fonctionnaient, avec de l'orge. Pour TR1, l'opération en cours était vraisemblablement une vidange de la cellule C15 pour

transiter l'orge vers le hangar FGH et pour TR2,

il s'agissait probablement d'un transfilage interne en vue de la même opération.

De plus, les constats effectués par le personnel SEMABLA sur les bandes transporteuses TB5 et TB6 semblent indiquer qu'une opération de désilage avait lieu conduisant à transférer de l'orge du silo vertical vers le hangar FGH.

L'état de remplissage du silo a été reconstitué à partir de diverses observations. Ainsi, il peut être retenu que le silo était presque plein et que la majorité des unités de stockage vides étaient les boisseaux intercalaires.

VI-4. SCÉNARIOS ENVISAGEABLES, RECHERCHE DES CAUSES VI-

4-1. CONTEXTE D'EXPLOITATION DU SILO

Des constats et analyses effectués, il ressort que l'élévateur E2 était utilisé avec du maïs, l'unité de stockage de destination étant inconnue. Elle pouvait se situer aussi bien dans la première que dans la seconde tranche. Du fait de la manutention du maïs, cette première unité de stockage était ouverte sur la galerie sur-cellules. Dans la mesure où il s'agissait du premier camion, elle peut légitimement être considérée comme quasiment vide. De plus, il est vraisemblable que l'unité de stockage utilisée était un boisseau intercalaire.

L'élévateur E3 était utilisé, au moment même de l'accident, pour effectuer la vidange de C11. Cette vidange ne semble justifiée que pour une opération de transit d'orge à destination du hangar FGH. Dans ce cas, il est plausible et logique de transiter par la cellule C1 qui va être de ce fait également ouverte sur la galerie sur-cellules.

L'élévateur E1 permettait l'opération de transit à destination du hangar FGH. Il est plausible de retenir qu'il était alimenté par la vidange de C15 et par jetée directe de C1.

Enfin, il est légitime de retenir que l'opération d'ensilage du blé devait tout juste venir de se terminer. Dans un tel cas, il semble éventuellement envisageable que la trappe d'accès à la cellule en cours de chargement soit encore ouverte sur la galerie sur-cellules. La localisation de la cellule de destination ne peut être précisée. Celle-ci devait être cependant au 2/3 vide.

En d'autres termes, il est possible de considérer que deux cellules, éventuellement et très temporairement 3, permettaient une communication entre le ciel d'unités de stockage et la galerie sur-cellules, dont notamment la cellule C1 (orge). Les deux autres unités de stockage devaient être quasiment vides ou au 2/3 vides respectivement de maïs et de blé.

VI-4-2. DÉROULEMENT DU PHÉNOMÈNE D'EXPLOSION

Les témoignages recueillis permettent de déterminer le volume initial dans lequel l'explosion a pris naissance. Celle-ci s'est propagée au sein de la galerie sur-cellules, jusqu'à son extrémité sud, sans doute en raison de la remise en suspension de poussières déposées.

Les flammes de cette explosion, probablement sous la forme de jet, ont pu déboucher dans les unités de stockage qui étaient ouvertes. Celles-ci étaient probablement au nombre de 2,

éventuellement de 3.

Le jet de flammes pénétrant au sein des unités de stockage, empoussiérées par les opérations d'ensilage, a engendré une violente explosion.

La géométrie de ces unités de stockage, et en particulier leur forme allongée a, sans aucun doute, contribué au développement des effets de pression. Cette remarque s'applique tout particulièrement au boisseau intercalaire dans lequel pouvait être entreposé le maïs. Pour mémoire, le rapport hauteur sur diamètre hydraulique étant voisin de 10, il est possible que cet aspect, conjugué à la réactivité du maïs, explique, en grande partie, les dommages constatés dans la partie centrale du silo.

De plus, la destruction de la galerie sur-cellules et de son plancher en particulier, a rendu possible la communication entre cette galerie et l'espace sous-cellules au niveau des boisseaux intercalaires situés à la jonction des deux tranches du silo.

Une propagation de l'explosion par cette communication semble possible, ce volume n'ayant jamais fait l'objet d'un nettoyage particulier. Des dépôts de poussières sur les parois de ce volume sont donc probables.

Au niveau de la tour de manutention nord et de façon concomitante à l'éclatement de la cellule C1, l'explosion s'est développée de haut en bas. Le niveau de pression atteint n'a pas pu, dans ce cas également, être limité du fait de l'absence de surfaces d'évent. La tour de manutention nord a, de ce fait, été détruite. Le vecteur de propagation n'est ni les gaines des élévateurs, ni les conduites du circuit centralisé d'aspiration des poussières. Il semble raisonnable de considérer que cette propagation s'est réalisée dans le volume même de la tour de manutention. Cette conclusion partielle suppose cependant la présence d'un nuage inflammable dans ce volume. La présence d'éventuels dépôts peut raisonnablement être exclue du fait des nettoyages réguliers qui étaient pratiqués. De ce fait, seul un mécanisme accidentel d'épandage de poussières est de nature à permettre la mise en suspension de ces poussières du haut en bas de la tour de manutention. Le seul processus envisageable, permettant de répandre une quantité significative de poussières du haut en bas de la tour de manutention, réside dans une rupture en aval du ventilateur d'aspiration des poussières. Ce mécanisme d'épandage est notable, en particulier dans l'hypothèse d'une rupture de la réserve à poussières.

L'explosion a débouché dans la partie sous-cellules, soit par le pied de la tour de manutention, soit plus probablement, à notre sens, par les boisseaux intercalaires situés à la jonction entre les deux tranches. Dans cette seconde hypothèse, la propagation de l'explosion via les boisseaux intercalaires est de nature à permettre à la flamme de s'accélérer notablement, du fait de leur configuration géométrique, en induisant d'importants effets de pression. Dans ces conditions, les ondes de pression émises au débouché inférieur des boisseaux intercalaires peuvent être d'une intensité largement suffisante pour détruire les unités de stockage adjacentes et, en grande partie, le voile béton séparant la galerie sous-cellules de l'extérieur. Ces ouvertures au niveau de la galerie sous-cellules, peu avant le passage de la flamme, ont pu constituer autant de surfaces d'évent, limitant de ce fait, le niveau de surpression atteint au sein même de la galerie sous-cellules.

La destruction des voiles béton de la galerie sous-cellules peut donc provenir des ondes de pression engendrées par la propagation de haut en bas de l'explosion ou de l'effondrement même des structures. Cet enchaînement est cohérent avec le fait que la destruction des voiles béton de

l'espace sous-cellules intervient plutôt vers la fin du processus d'explosion, comme cela a été rapporté par des témoins. Une représentation très schématique du parcours supposé de l'explosion est fournie sur la figure 6.



Figure VI. 6 : Parcours supposé de l'explosion

L'effondrement des structures a pu être facilité par d'éventuelles fragilités structurelles. Celui-ci et la chute des équipements ont inévitablement provoqué des courts-circuits, en particulier au niveau du local du transformateur situé à l'entresol des locaux administratifs et techniques. Ceux-ci peuvent avoir été à l'origine des incendies localisés consécutivement à l'explosion.

De façon similaire, la propagation de la flamme et l'expansion des gaz brûlés a pu permettre, en particulier, l'inflammation de matériaux combustibles ou des effets thermiques sur des matières plastiques.

Les incendies de cellules constatés après l'explosion étaient situés en particulier à la surface supérieure du stockage. Ils peuvent avoir été engendrés par la chute de matériaux combustibles enflammés suite au passage de la flamme.

VI-4-3. RECHERCHE DES CAUSES DU SINISTRE

Les deux points clefs dans la détermination des conditions de ce sinistre ont résidé dans la recherche des conditions de formation d'une atmosphère explosive et dans l'identification de la source d'inflammation.

Concernant la formation d'une atmosphère explosive, deux possibilités ont été envisagées. La première possibilité est relative à la formation de gaz combustibles dans le ciel d'unités de stockage, engendrée par une situation dégradée telle que, par exemple, un auto-échauffement, une fermentation ou un début d'incendie.

La seconde possibilité correspond à un mélange inflammable de poussières et d'air. A la lumière des constats et témoignages, la première possibilité peut être raisonnablement exclue. La seconde possibilité, quant à elle, correspond à l'explosion d'un mélange de poussières et d'air, ce

mélange pouvant exister dans des parties de l'installation. Ce type d'explosion a couramment été rencontré lors d'autres accidents. Sur la base de témoignages et de constats effectués, il est possible de considérer que l'explosion a débuté soit dans le circuit de dépoussiérage, soit au sein même des volumes de la structure du silo, dans la mesure où une origine dans le circuit "produit" peut être raisonnablement exclue. L'examen des sources d'inflammation envisageables, repris ci-après, conduit à retenir des sources d'inflammation plausibles, internes au circuit de dépoussiérage. En conséquence, seul le premier terme de l'alternative ci-dessus est à considérer.

La recherche de la source d'inflammation a été plus délicate à mener dans la mesure où les travaux par points chauds ont pu être exclus relativement rapidement. Les catégories de sources d'inflammation restant envisageables étaient les suivantes : étincelles ou échauffements mécaniques, électricité statique, étincelles électriques, auto-inflammation d'un dépôt de poussières. Dans le cas présent, les étincelles d'origine électrostatique n'ont pas été retenues comme source d'inflammation de l'explosion, compte tenu notamment de l'énergie minimale d'inflammation relativement élevée.

De l'analyse des différentes possibilités, et en tenant compte du fait que l'on n'a pas retrouvé d'éléments du système de collecte des poussières, il ressort que l'inflammation génératrice de cette explosion a pour origine, de façon plausible, soit des chocs ou frottements mécaniques au niveau du ventilateur du circuit centralisé de dépoussiérage, soit un début d'incendie par auto-échauffement au niveau de la réserve à poussières.

VI-5. ENSEIGNEMENTS ISSUS DE L'ANALYSE DE L'ACCIDENT

De l'analyse du déroulement de cet accident et en tenant compte des incertitudes qui lui sont associées, il ressort que les principaux enseignements, pour un silo de structure analogue à celle de Blaye, concernent plusieurs domaines qui peuvent être organisés en suivant le processus même d'une explosion. Ils sont énumérés ci-après, par thème.

- Prévention de la formation d'une atmosphère explosive :
 - Surveiller la température au sein des boisseaux intercalaires, Utiliser des moyens de vidéosurveillance, couplés ou non à des moyens de détection
 - Déterminer les limites de fonctionnement du système d'aspiration des poussières, tout particulièrement pour les systèmes de type centralisé,
 - Surveiller en permanence l'efficacité d'aspiration d'un système centralisé de dépoussiérage par le biais, par exemple, d'une mesure de dépression,
 - Assurer le capotage des manches filtrantes ou mettre en place tout dispositif équivalent permettant de prévenir tout risque d'épandage de poussières dans des installations largement closes. La mesure la plus adéquate consisterait à installer ces équipements hors de toute installation largement close, c'est à dire à l'air libre,
 - Isoler, dans la mesure du possible, les différentes parties du silo les unes des autres (le terme « parties du silo » désigne, par exemple, la tour de manutention, la galerie sur-cellules ou l'espace sous-cellules).
- Suppression des sources d'inflammation :
 - Installer, sur les principaux équipements, des détecteurs d'étincelles ou tout dispositif équivalent, commandant l'arrêt de l'équipement,

- Mettre en place un système de détection d'une augmentation anormale de température de certains équipements (paliers du ventilateur du système centralisé de collecte des poussières, par exemple). Propagation de l'explosion :
 - Séparer les différentes structures de façon à limiter la propagation de l'explosion (ce qui conduit aussi à limiter les effets),
 - Installer les systèmes centralisés de collecte des poussières, dans la mesure du possible, hors de toute installation confinée, c'est à dire à l'air libre.

- Limitation des effets :
 - Disposer des événements sur les structures abritant des équipements de manutention des céréales et sur les unités destockage,
 - Déterminer les modalités et limites des calculs d'événement pour des structures allongées, lors d'une inflammation par un jet de flammes,
 - Interdire ou limiter l'usage de capacités dont le rapport longueur sur diamètre est élevé (c'est-à-dire supérieur à 5) et en particulier les boisseaux intercalaires.

- Limitation des conséquences :
 - Etudier au cas par cas la distance d'éloignement des bâtiments occupés par des tiers¹, la valeur de 1,5 fois la hauteur du silo devant être comprise comme étant une distance minimale,
 - Eloigner du silo toutes les personnes dont l'activité n'est pas utile au fonctionnement direct de celui-ci.

- Autres enseignements :
 - installer des détecteurs d'incendie dans les zones où existe un risque d'incendie dû à des matières combustibles autres que les céréales,
 - nettoyer régulièrement les conduites du circuit de soufflage d'air en pied de cellules,
 - adapter le seuil d'alarme de température de stockage aux conditions climatiques extérieures, sous réserve de justification technique tenant compte notamment de la cinétique du phénomène d'auto-échauffement.

Remarque : *Dans le cadre de l'étude des dangers, chaque silo doit faire l'objet d'une analyse des risques.*

¹ **Tiers** : extrait de la circulaire DPPR / SEI du 16 octobre 1997 (non publiée au JO) « Pour l'administration, hormis le conjoint, les enfants de l'exploitant et ses employés logés par ses soins, toute personne étrangère à l'exploitation a la qualité de tiers par rapport à l'installation ».

CONCLUSION GENERALE

Les différentes mesures effectuées dans les industries agro-alimentaires considérées ont permis de soulever un certain nombre de lacunes dans le respect des normes de la qualité de l'air.

Les niveaux de pollution mesurés dans les semouleries et les minoteries permettent d'apprécier la nocivité éventuelle de l'atmosphère, de suivre la quantité des poussières émises ainsi que l'impact des mesures d'assainissement.

Le captage à la source est de loin le plus efficace en termes de propreté pour éviter l'émission de poussières de farine.

Afin d'améliorer le niveau de la sécurité, on utilise les moteurs non producteurs d'étincelle en fonctionnement normal. Les aspirateurs industriels sont destinés au nettoyage des surfaces du fournil, en particulier les sols, ainsi que les équipements sur ou dans lesquels se déposent des poussières de farine afin de ne pas présenter des risques des allergies respiratoires.

L'étude de la problématique des incendies et des explosions de poussières dans les industries agro-alimentaires a permis d'apprécier la gravité des accidents survenus d'une part, la diversité des filières concernées et la complexité du mécanisme menant à l'accident d'autre part.

Les barrières mises en place par les mesures de prévention et les moyens de protection doivent être nécessairement accompagnées par une formation de tout le personnel travaillant sur des installations où des risques d'incendie et d'explosion de poussières sont présents.

Les incendies et les explosions dans les industriels sont toujours présents, c'est pourquoi le rôle important de tenir les organismes d'assurance dans la promotion d'actions en faveur de l'amélioration de la sécurité en complément de l'évolution du cadre réglementaire.

RECOMMANDATIONS / SUGGESTIONS

Les accidents dans les minoteries et les semouleries se produisent à travers tous les pays du monde, Tous les ans, plusieurs personnes souffrent de ces accidents bien que des mesures de prévention et de protection sont prises ainsi que les mesures réglementaires sont appliquées dans la plupart des minoteries et les semouleries.

Dans tout processus technologique en particulier des minoteries et des semouleries, les opérations tels que le transport, la vidange et le remplissage dégagent énormément de poussières.

En dépit de leur dotation en matériel de ventilation notamment le transport pneumatique des produits en ascension, il y a toujours il y a toujours une présence considérable de poussières qui se colmate dans tous azimuts (Direction).

A cet effet, il est recommandé ce qui suit :

- L'installation en chaque point de chutes ou de transits du flot de grains ou de produits à l'intérieur de l'élévateur à godets une prise d'aspiration reliée au circuit de dépoussiérage pour que le nuage de poussières qui se forme en ces points est alors aspiré.
- L'installation de prises d'au niveau d'aspiration planchers de la tour de travail pour l'aspiration des poussières folles ;
- L'installation des hottes d'aspiration au niveau des postes d'ensachages et de battage des sacs ;
- Un dé-colmatage systématique du système d'aspiration (filtres, cyclones, tuyauterie...);
- Eviter les pertes de charges du réseau d'aspiration et du transport pneumatique par éremisation des appareils, de la tuyauterie et des trappes ;
- Le chargement des conduites usées servant au transport par gravité ;
- Procéder à bonne jonction des tuyaux entre eux et les équipements afin d'éliminer l'émanation des poussières ;
- Maintenir l'extraction, l'ordre, la propreté des ateliers de manière que la poussière ne puisse s'accumuler sur les structures extérieurs des équipements et des bâtiments environnants ;
- Eliminer les sources d'inflammation (frottements, cigarettes...);
- Etanchéité des installations d'éclairage électriques dans les silos par exemple pour cause de poussières ;
- Mise à la terre de tous les équipements électriques ;
- Mise à la terre du réseau des conduits, chaines de godets et les cellules à blé et à produits ;
- Eviter les manutentions ou les taches de soudures ou de coupures au voisinage des silos de stockages afin d'éviter toute étincelle inflammables ;
- Utiliser du matériel approprié et faire appel à des intervenants qualifiés ;
- Travailler dans les zones sécurisées et équipées de systèmes de détection (caméra, extincteur...).

BIBLIOGRAPHIE

N°	DESIGNATIONS
[1]	http://www.techno-science.net/glossaire-définition/Ble.html
[2]	http://www.yara.fr/fertilisation/solutions-pour-cultures/ble/histoire-developpement-culture-ble
[3]	Mémoire de monsieur "Djelti Hichem" sur l'étude de la qualité du blé tendre utilise en meunierealgerienne
[4]	Mémoire de Mm "Boukarboua Amina" et Mm "Boulkroun Bouchra" sur appréciation de la qualité technologique des farines commerciales par des test indirects
[5]	http://technomitron.aainb.com/constituants-pain-et-pate/le-ble-tranformation-mouture/
[6]	https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00625530/document
[7]	Mémoire de Mm "BenhaniaZhour" sur l'étude de la fabrication de la farine et controle de sa qualité
[8]	Mémoire de Mm "Meghazi Nassima" sur l'activité antifongique de quelques huiles essentielles sur les moisissures du blé stocké
[9]	http://www.universalis.fe/encyclopedie/ble/
[10]	Mémoire des étudiants "BelhamdiKh", "Benchikh FZ", "Ghani A", "Tourche F" sur la transformation industrielle du blé, utilisation et approches technologiques.
[11]	https://www.editions-tissot.fr/droit-travail/dictionnaire-droit-travail-definition.aspx?idDef=651&definition= Poussi%C3%A8res
[12]	http://www.ltbag.ch/les-types-de-poussieres-et-leur-grandeur-de-particules/
[13]	Saisie de documents donnés par monsieur Kaddar
[14]	https://www.universalis.fr/dictionnaire/colloidal/
[15]	https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais
[16]	http://dico-sciences-animales.cirad.fr/liste-mots.php?fiche=17001&def=mati%C3%A8res+azot%C3%A9es+totales
[17]	https://fr.wikipedia.org/wiki/Cendre
[18]	https://www.futura-sciences.com/sante/definitions/biologie-amidon-645/
[19]	https://www.aquaportail.com/définition-1555-cellulose.html
[20]	C.APRO.GA La Meunière-Dossier de Demande d'autorisation Environnementale – Site d'Amelly (45) décembre 2018
[21]	https://ec.europa.eu/taxation_customs/dds2/SAMANCTA/FR/Safety/Dust_FR.htm#
[22]	file:///C:/Users/YASMIN%20INFO/Desktop/GT%20farine.pdf
[23]	https://www.universalis.fr/encyclopedie/pollution/
[24]	http://www.toupie.org/Dictionnaire/Pollution.htm
[25]	https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/pollution/62217
[26]	https://www.dictionnaire-environnement.com/pollution_ID722.html#:~:text=La%20pollution%20d%C3%A9signe%20l'introduction,entra%C3%A9nent%20des%20d%C3%A9t%C3%A9riorations%20aux%20biens
[27]	https://fr.wikipedia.org/wiki/Pollution
[28]	https://puzzlefactory.pl/fr/etiquettes/Pollution+sonore

[29]	Mémoire de Mm "El Hade El Okki Lydia" sur l'étude des valeurs d'appréciation de la qualité technologique et biochimique des nouvelles obtentions variétales de blé dur en Algérie"
[30]	https://www.maqualitedelair-idf.fr/c-est-quoi/sources-de-pollution/#:~:text=Le%20secteur%20domestique%20est%20la,source%20importante%20de%20particules%20fines
[31]	http://www.atmo-grandest.eu/air-exterieur-sources-et-effets
[32]	https://www.actu-environnement.com/ae/news/pollution-naturelle-eaux-sols-aquatrain-10649.php4
[33]	http://www.cotebleue.org/pollindust.html
[34]	Budillon Rabatel « Carrière de Sain-Paul-lès-Romans »
[35]	https://www.cchst.ca/oshanswers/chemicals/lungs_dust.html?=-undefined&wbdisable=true#:~:text=Les%20poumons%20sont%20les%20organes,retournant%20%C3%A0%20l'air%20ambiant.
[36]	https://www.busesdepulverisation.fr/applications/traitement-des-poussi%C3%A8res
[37]	https://www.depollunet.net/precis/iii-le-systeme-d-aspiration.html
[38]	https://www.ademe.fr/entreprises-monde-agricole/reduire-impacts/reduire-emissions-polluants/dossier/poussieres-particules/techniques-depoussierage
[39]	http://www.irma-ps.com/fra/vrecastifilteri.html
[40]	http://tpe-aspirateur-cyclonique.e-monsite.com/pages/i-l-aspirateur-cyclonique.html
[41]	C.APRO.GA La Meunière-Dossier de Demande d'autorisation Environnementale – Site d'Amelley (45) décembre 2018
[42]	https://www.officiel-prevention.com/dossier/formation/fiches-metier/la-prevention-des-risques-professionnels-dans-les-minoteries-et-semouleries
[43]	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
[44]	https://www.editions-tissot.fr/droit-travail/dictionnaire-droit-travail-st-definition.aspx?idDef=1293&definition=Incendie
[45]	INRS, mélange explosifs, poussières combustibles
[46]	Larousse.fr
[47]	Mémoire RCH4 année 2010
[48]	https://selectra.info/energie/guides/comprendre/pouvoir-calorifique-superieur
[49]	IUT hygiène sécurité environnement, Bordeaux
[50]	Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement Département Evaluation, Modélisation et Analyse des Risques Personnes ayant participé à l'étude F. MASSON - J.F. LECHAUDEL juillet 1998

Annexes :

Surpression appliquée (mbar)	Nature des dégâts
Jusqu'à 70 mbar	Risques minimales
De 150 à 200 mbar	Renversement des personnes
350 mbar	Rupture des tympanes
1000 mbar	Lésions aux poumons

Annexe 1 : *les risques encourus par les personnes soumises à la surpression d'une explosion*

Agent extincteur	Avantages	Inconvénients
Eau	Grande facilité de mise en œuvre	Importance de la quantité d'eau apportée
Mousse bas foisonnement	Limitation relative de la quantité d'eau apportée Facilité de mise en œuvre Isole partiellement l'air du combustible	Importance relative de la quantité d'eau apportée Nécessité d'entretenir le tapis de mousse au fil du temps Projection d'eau avant l'obtention d'une mousse de qualité
Mousse moyen foisonnement	Limitation de la quantité d'eau apportée Mise en œuvre relativement aisée Isole partiellement l'air du combustible	Nécessité d'avoir le matériel adapté Nécessité d'entretenir le tapis de mousse au fil du temps Projection d'eau avant l'obtention d'une mousse de qualité
Mousse haut foisonnement	Limitation de la quantité d'eau apportée Isole partiellement l'air du combustible	Difficulté de mise en œuvre (injection difficile dans une enceinte confinée et risque de « pollution » d'une capacité intacte) Nécessité d'entretenir le tapis de mousse au fil du temps Projection d'eau avant l'obtention d'une mousse de qualité

Annexe 2 : *Les avantages et les inconvénients des agents d'extincteurs*

Sécurité sur les élévateurs	Sangles antistatiques et difficilement propagatrices de flammes Déport de sangles Contrôleur de rotation Fonctionnement asservi à l'aspiration
Sécurité sur les autres transporteurs	Bandes antistatiques et difficilement propagatrices de flammes Contrôleurs de rotation Fil d'arrêt d'urgence sur les tapis (galeries supérieures)
Sécurité sur les appareils de mouture	Sonde Température sur les broyeurs Contrôle surintensité des moteurs Présence d'aimants et épierreurs
Sécurité sur les filtres	Mise à la terre des parties métalliques des filtres à l'aide de tresses Ventilateur d'extracteur d'air placé dans le flux d'air propre Event correctement dimensionné ou surface soufflable sur existant Ecluses faisant office de découplage
Sécurité Générale	Disjoncteur sur les moteurs Coups de poing d'arrêt d'urgence sur les équipements Plan d'évacuation affiché. Extincteurs répartis aux différents paliers Classement ATEX Hors Zone (pas de poussière et maximum de volume) Découplage maximum des volumes Nettoyer les installations Paratonnerres répartis sur l'ensemble du site

Annexe 3 : Réduction des potentiels des dangers et risque

