الجمهـــوريـــــة الجزائـــريـــــة الديمقـــراطيـــة الشـعبيـــة

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التـــعلـــيـــــم العـــــالـــــــي والبـــحـــــــث العـلمـــــي

Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique

جامعة وهران 2 محمد بن أحمد

Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed

معهد الصيانة والأمن الصناعي

Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle

Département de Sécurité Industrielle et Environnement

MÉMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de Master en sécurité industrielle et Environnement

La lutte contre la poussière

Etude de cas : Entreprise CCLS ORAN

Présenté par :

Mr MESSABIH Med Nadir

Mr HACHILIF Fayçal Ali

Devant le jury composé de :

Président : Mm.Talbi Zahira

Examinateur : Mr. NADJI Amine

Encadreur : Mr. TAHRAOUI Mohammed

Année universitaire : 2024/2025

Remerciements

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de ce travail. Nous remercions tout particulièrement la direction et l'équipe de l'entreprise CCLS pour leur accueil chaleureux, leur disponibilité et l'accès privilégié qu'ils nous ont offert à leurs installations et données.

Nous remercions également nos encadreurs, dont les conseils avisés et le soutien constant ont été essentiels pour mener à bien cette étude. Notre reconnaissance va aussi à nos enseignants pour leurs encouragements et leur aide précieuse tout au long de notre cursus.

Enfin, nous adressons nos remerciements à notre famille pour sa patience, son soutien moral et sa confiance indéfectible, sans lesquels cette réalisation n'aurait pas été possible

Dédicaces

Nous dédions ce mémoire à nos parents, piliers de notre vie, pour leur soutien indéfectible et leurs encouragements constants. À nos familles et à nos amis Kacel yacine ,Aouali habib , pour leur présence et leur confiance tout au long de ce parcours. Que ce travail soit à la hauteur de l'affection et de la patience qu'ils nous ont témoignées.

SOMMAIRE

Liste des abréviations

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction ………...1

Chapitre I : Présentation de l'entreprise

I.1 Historique…….....2
I.2 Compartiment CCLS (dock 2 sidi Belkhir) …….2
I.3 Structure et organisation de l'entreprise……...2
I.4 Activités et missions…….....3
I.4.1 Le Stockage…….4
I.4.2 Les silos…….....4
I.4.3 Les fosses de réception ……..... 6
I.4.4 Les produits stockés……....7
I.4.5 Les équipements ……7

Chapitre II. Généralité sur la poussière

II.1 Définition de la poussière industrielle…….9
II.2 Typologie et classification des poussières ……..9
II.3 Sources de la poussière dans les industries ……...12
II.4 Risques liés aux poussières……13
II.5 Normes et réglementations en matière de poussière……..16
II.6 La poussière des céréales et légumes sec ……..17
II.6.1 Sources de poussière des céréales et légumes sec ……..17
II.6.2 Risques liés aux poussières des céréales et légumes sec…….....18
II.6.3 Impacts de poussières des céréales et légumes sec……..19

Chapitre III : Techniques et technologies de dépoussiérage

III.1 Technologie et enjeux du dépoussiérage en industrie.....21
III.2 Equipements de filtration……21
III.1.1 Le filtre cyclonique……..21
III.1.2 Le filtre à manches……...24
III.1.3 Le filtre à cartouches…….....26
III.3 Systèmes d'aspiration ……27
III.4 Maintenance préventive……28
III.5 Formation des travailleurs……..29
III.6 Aménagement des postes de travail……...30
III.7 Les équipements de protection individuelle …….....31
III.8 Panneaux de signalisation……..33

Chapitre IV : Études de cas (l'entreprise CCLS)

IV.1 Sources de poussière dans le processus de stockage……..35
IV.2 Identification des risques……36
IV.3 Évaluation des risques……37
IV.4 Mesures mise en place par la CCLS pour le contrôle des poussières……43
IV.5 Recommandation ……..44
IV.5.1 Nettoyage des silos……45
IV.5.2 Désinfection des silos……47

Chapitre V : Défis et perspectives d'avenir

V.1 Défis actuels ……48
V.2 Dépoussiérage par brouillard sec……..48
V.3 Système IoT et surveillance en temps réel……....50

Conclusion

Références Bibliographie

Liste des abréviations

CCLS : Coopérative des Céréales et des Légumes Secs

OIAC : Office Algérien Interprofessionnel des Céréales

VLEP : Valeurs Limites d'Exposition Professionnelle

INRS : Institut National de Recherche et de Sécurité

CIRC : Centre International de Recherche sur le Cancer

ATEX : Atmosphères Explosibles

BPCO : Broncho-Pneumopathie Chronique Obstructive

FDS : Fiche de Données de Sécurité

DUER : Document Unique d'Évaluation des Risques

AMDEC : Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité

HAZOP : Hazard and Operability Study

RPN : Risk Priority Number

IOT : Internet of Things

Liste des figures :

FIGURE 1 : STRUCTURE DE L'ENTREPRISE 2
FIGURE 2 : COLLECTE ET STOCKAGE 3
FIGURE 3 : SILOS EN BETON ARME 4
FIGURE 4 : SILOS METALLIQUE 5
FIGURE 5 : FOSSE DE RECEPTION 6
FIGURE 6 : TRANSPORTEUR 8
FIGURE 7 : DEPOUSSIEREUR 8
FIGURE 8 : L'INHALATION DE POUSSIERE 13
FIGURE 9 : EXPLOSION DE SILOS 14
FIGURE 10: IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DE LA POUSSIERE 20
FIGURE 11 : CYCLONE INDUSTRIEL 22
FIGURE 12 : DEPOUSSIEREUR FILTRES A MANCHES 24
FIGURE 13 : HOTTES INDUSTRIELLES 27
FIGURE 14 : TYPE DE MASQUE 31
FIGURE 15 : PROTECTION CUTANEE 32
FIGURE 16 : PROTECTION OCULAIRE 32
FIGURE 17 : PANNEAU DE SIGNALISATION 33
FIGURE 18 : RISQUE ATEX 34
FIGURE 19: DEPOUSSIERAGE PAR BROUILLARD SEC (MIST AIR) 49
FIGURE 20 : SYSTEME DE DEPOUSSIERAGE INTELLIGENT BASE SUR L'IOT 51

Liste des tableaux :

TABLEAU 1 : COMPOSITION CHIMIQUE DES POUSSIERES 11
TABLEAU 2 : ZONAGE D'ATMOSPHERE EXPLOSIVE POUSSIEREUSE 15
TABLEAU 3 : EFFICACITE DES FILTRES CYCLONIQUES 22
TABLEAU 4 : ECHELLE DES GRAVITES 37
TABLEAU 5 : ECHELLE DES OCCURRENCES 38
TABLEAU 6 : ECHELLE DES DETECTIONS 38
TABLEAU 7 : SEUILS CRITIQUES DU RPN 39
TABLEAU 8: AMDEC POUR LE STOCKAGE DES CEREALES 40
TABLEAU 9:HAZOP POUR LE STOCKAGE DES CEREALES 42

Résumé

La poussière industrielle constitue l'un des risques majeurs dans les unités de stockage et de transformation des produits céréaliers. Sa présence excessive entraîne non seulement une dégradation de la qualité des produits stockés, mais aussi des risques importants pour la santé des travailleurs et pour la sécurité des installations, notamment les explosions de poussières. Ce mémoire s'inscrit dans le cadre de l'étude et de l'évaluation des sources de poussière au sein de l'entreprise CCLS (dock 2 Sidi Belkhir).

Après une présentation générale de l'entreprise et de ses activités, une analyse approfondie des poussières industrielles et de leurs impacts a été réalisée. Ensuite, les différentes techniques et technologies de dépoussiérage ont été exposées, allant des systèmes de filtration aux équipements de protection individuelle, en passant par la maintenance et l'organisation du travail. Une étude de cas pratique menée au niveau de la CCLS a permis d'identifier les sources de poussières, d'évaluer les risques, et d'analyser les mesures existantes. Enfin, des recommandations ont été formulées afin d'améliorer l'efficacité du système de dépoussiérage et de proposer des perspectives innovantes, notamment l'intégration des technologies IoT pour une surveillance en temps réel.

ABSTRACT

Industrial dust is one of the major risks in storage and processing units of cereal products. Its excessive presence causes not only a degradation in the quality of stored products but also significant health risks for workers and safety hazards for the facilities, especially dust explosions. This thesis is part of the study and assessment of dust sources within the company CCLS (dock 2 Sidi Belkhir). After a general presentation of the company and its activities, an in-depth analysis of industrial dust and its impacts was conducted. Then, the different dust removal techniques and technologies were presented, ranging from filtration systems to personal protective equipment, including maintenance and work organization. A practical case study carried out at CCLS identified dust sources, assessed risks, and analyzed existing measures. Finally, recommendations were made to improve the efficiency of the dust removal system and to propose innovative perspectives, notably the integration of IoT technologies for real-time monitoring.

ملخص

تُعتبر الغبار الصناعي أحد المخاطر الرئيسية في وحدات تخزين ومعالجة المنتجات الحبوبية. فإن وجوده المفرط يؤدي ليس فقط إلى تدهور جودة المنتجات المخزنة، بل أيضاً إلى أخطار صحية كبيرة على العمال ومخاطر أمنية على CCLS المنشآت، وخاصة انفجارات الغبار. يندرج هذا البحث في إطار دراسة وتقييم مصادر الغبار داخل شركة .(رصيف 2 سيدي بلخير)

بعد تقديم عام للشركة وأنشطتها، تم إجراء تحليل معمق للغبار الصناعي وتأثيراته. ثم تم عرض مختلف تقنيات وتكنولوجيات إزالة الغبار، بدءاً من أنظمة الترشيح إلى معدات الحماية الشخصية، مروراً بأعمال الصيانة وتنظيم تحديد مصادر الغبار، وتقييم المخاطر، وتحليل CCLS العمل. أتاحت دراسة حالة عملية أجريت على مستوى شركة التدابير القائمة. أخيراً، تم تقديم توصيات لتحسين فعالية نظام إزالة الغبار واقتراح آفاق مبتكرة، لا سيما دمج .تكنولوجيات إنترنت الأشياء للمراقبة في الوقت الحقيق .

Introduction générale

La poussière, bien qu'apparemment anodine, constitue dans le domaine industriel un enjeu majeur en matière de santé, sécurité et protection de l'environnement. Dans les industries de stockage et de traitement des céréales, la problématique de la poussière est amplifiée en raison du caractère pulvérulent des grains, de leur manipulation fréquente et de la diversité des procédés utilisés.

Les poussières générées ne représentent pas seulement une nuisance pour les travailleurs (maladies respiratoires, inconfort, baisse de productivité), mais également une menace pour la sécurité des installations à travers les risques d'incendie et d'explosion. Conscients de ces enjeux, de nombreux industriels mettent en place des systèmes de dépoussiérage et des dispositifs de prévention afin de réduire l'impact de ce phénomène. Dans ce contexte, le présent mémoire s'intéresse à l'étude du dépoussiérage industriel dans une entreprise de stockage et de gestion des céréales, à savoir la **CCLS de Sidi Belkhir**. L'objectif principal est d'analyser les sources de poussières, d'évaluer les risques associés et d'étudier les méthodes de contrôle existantes. Par ailleurs, ce travail vise à proposer des recommandations et des perspectives en matière de lutte contre les poussières, notamment par l'intégration des nouvelles technologies.

Chapitre I

Présentation de l'entreprise

I.1 Historique

La CCLS d'Oran a été créée en 1932 dans le cadre des efforts du gouvernement algérien pour structurer et moderniser le secteur céréalier. Elle fait partie du réseau des 41 CCLS réparties sur le territoire national, sous la supervision de l'OAIC. Depuis sa mise en place, elle joue un rôle stratégique dans l'approvisionnement des producteurs et la gestion des stocks de céréales et légumineuses [1] .

Les CCLSs sont implantés à Oran dans 3 localités principales :

- Oued Telilat (SIDI BELKHIR)
- Saint Hubert.
- Es Senia

I.2 Compartiment CCLS (dock 2 sidi Belkhir)

La coopérative des céréales et légumes secs située à Oued Telilat comprend 10 silos principaux dont 9 d'une capacité de 2800 tonnes et un (silos 1) d'une capacite de 2100 tonnes ainsi que 4 silos secondaires, chacun ayant une capacité de 800 tonnes. Chaque silo secondaire est situé entre deux silos principaux, ce qui donne un total de 14 silos, avec une capacité de stockage totale de 30 000 Tonnes

I.3 Structure et organisation de l'entreprise :

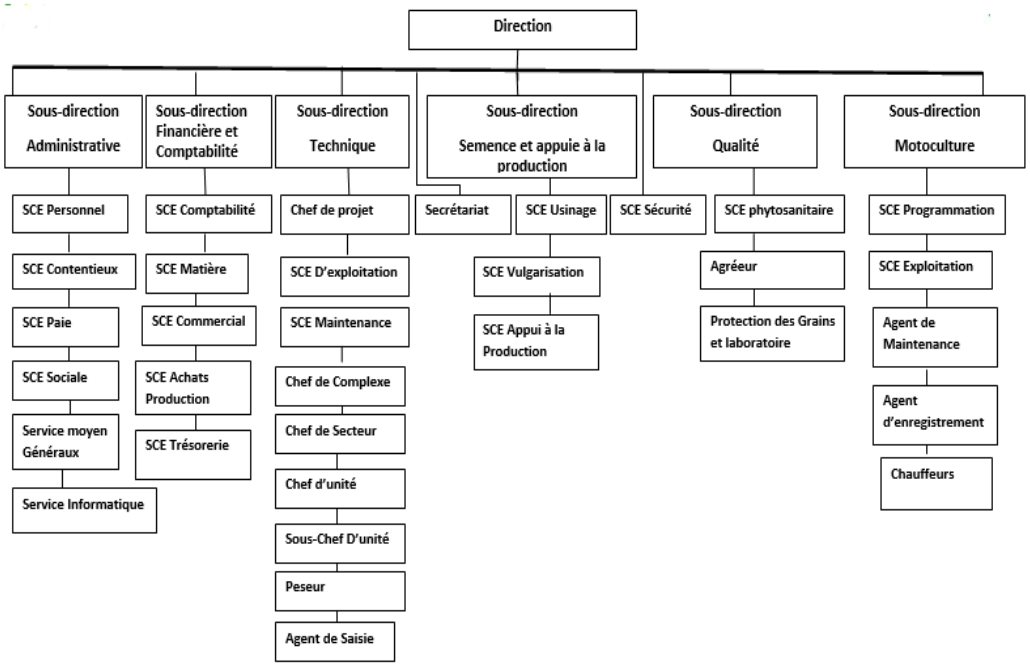


Figure 1 : Structure de l'entreprise

I.4 Activités et missions

Les principales missions de la CCLS d'Oran sont :

- ❖ La collecte et le stockage des céréales et des légumineuses telle qu'illustré par la (voir figure 2)
- ❖ La distribution aux agriculteurs sous forme de semences et d'aliments pour bétail.
- ❖ La commercialisation des produits auprès des meuniers et autres industries agroalimentaires.
- ❖ La garantie d'un approvisionnement stable du marché en produits agricoles essentiels.
- ❖ Le soutien aux agriculteurs à travers la mise à disposition de semences certifiées et de conseils techniques.

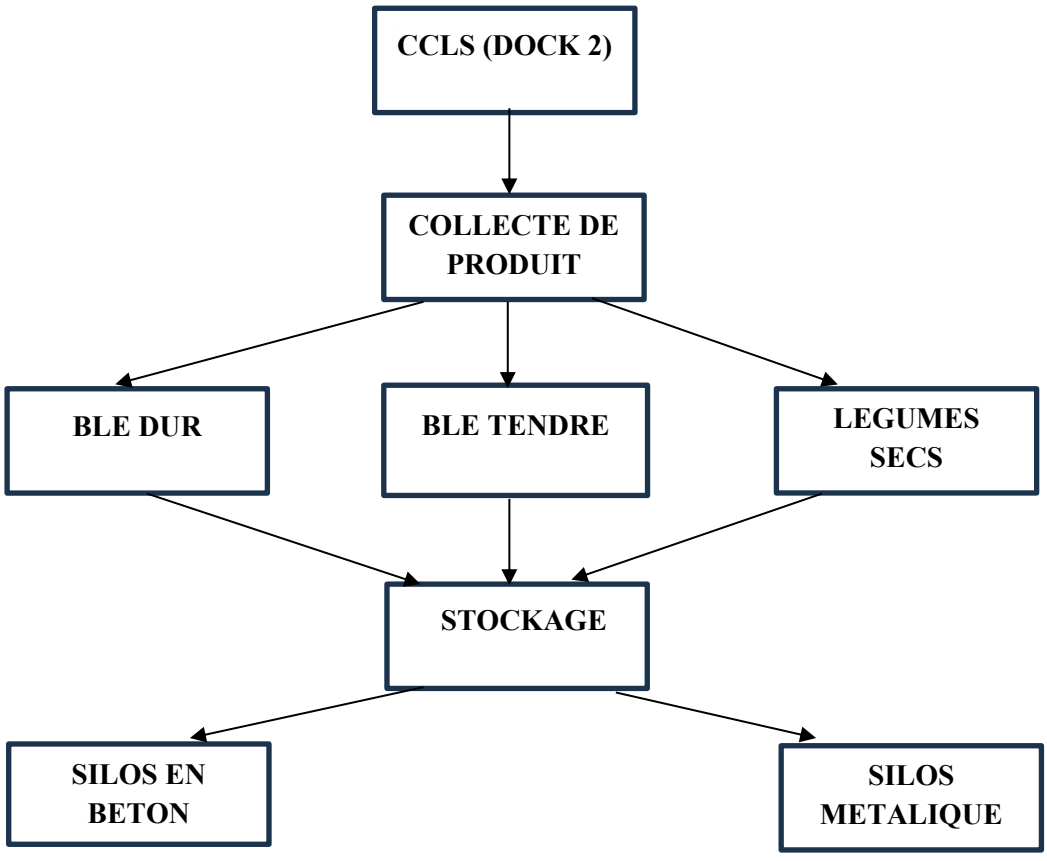


Figure 2 : Collecte et stockage

I.4.1 Stockage

Le produit que les agriculteurs livrent est placé dans le silo 1. Ce silo est divisé en deux parties : la première section contient le produit dans son état initial, où il est nettoyé des résidus et des impuretés à l'aide d'un appareil situé au centre des deux sections, appelé ébarbeur.

Après nettoyage, le produit descend dans la deuxième section du silo pour y être stocké de manière sécurisée jusqu'à sa redistribution.

I.4.2 Les silos

Les silos sont des réservoirs de grande capacité destinés au stockage commercial ou industriel de grandes quantités (milliers de tonnes) de produit.

Ils sont fermés sur le dessus par un plancher sur lequel est installé le dispositif de chargement des cellules. L'utilisation de silos réduit le travail, offre plus d'espace de stockage et élimine le besoin de sacs coûteux. Un silo est un conteneur cylindrique en béton armé ou en métal :

Le silo en béton armé est le support de stockage le plus courant et il est plus résistant à la pression et aux chocs que les silos métalliques. Ces silos sont constitués d'une série de cellules cylindriques en béton armé d'une hauteur de 20 à 22 m et la teneur en humidité des grains dans les silos ne doit pas dépasser 11 %. Le béton armé a des propriétés très intéressantes pour la construction d'installations de stockage. Un amortissement à long terme est possible car il s'agit d'un matériau durable qui ne nécessite ni peinture ni entretien. De plus, malgré la faible épaisseur utilisée (épaisseur de paroi cellulaire 15-20 cm), de bonnes propriétés d'isolation thermique du produit sont garanties.



Figure 3 : Silos en béton armé

Cependant, le béton armé présente certains inconvénients :

- Sa porosité permet l'échange de gaz avec l'extérieur, créant des problèmes lors de la manipulation des stocks.
- En raison de son poids, il ne peut être installé que sur des sols suffisamment résistants à la compression.
- Les structures en béton peuvent présenter des fissures et des microfissures qui permettent à l'eau de pénétrer et de créer un environnement favorable aux insectes.

En raison de ces inconvénients, leur mise en œuvre doit donc être effectuée par du personnel qualifié et une entreprise parfaitement équipée.

Le silo métallique est constitué d'alvéoles métalliques en tôles d'acier galvanisé ou d'aluminium (épaisseur 4 à 6 mm), plates ou ondulées, boulonnées ou agrafées à un sol en béton étanche et couramment utilisées pour le stockage des grains transformés., après broyage, dans l'alimentation du bétail. Les cellules mesurent de 2 à 4 mètres de diamètre et peuvent atteindre 20 mètres de hauteur.

Leur principal avantage réside dans leur installation, qui est généralement à la fois facile et rapide. Le coût de construction d'un silo métallique est faible car la structure est légère et peut être installée au sol avec une faible capacité portante.



Figure 4 : Silos métallique

Cependant, le silo métallique présente certains inconvénients :

- Le nettoyage des parois s'avère complexe en raison des conditions de températures extrême et de l'accès restreint.
- La qualité du produit entreposé peut être compromise.
- Le risque de contamination par des mycotoxines pose une menace significative pour la santé des consommateurs.
- Les coutures entre les revêtements textiles présentent des défauts, permettant l'infiltration d'eau de pluie.
- La condensation de la vapeur d'eau associée aux changements de température au cours de la journée humidifie le grain, créant des zones favorables à la reprise de leur germination et de l'activité microbienne.

I.4.3 Les fosses de réception

Le produit en provenance du port est initialement déchargé dans une zone dédiée, désignée sous le terme de fosses. Par la suite, ce produit est acheminé à l'aide d'un mécanisme propulsé par la force du vent, appelé élévateur. Ce dispositif permet un stockage organisé du produit au sein des silos, facilitant ainsi une redistribution efficace et optimisée.

Une fosse à grains est une structure creusée dans le sol, utilisée pour le stockage et la conservation des céréales. Elle permet de stocker rapidement et efficacement les grains, souvent en les protégeant de l'humidité et des insectes nuisibles, ce qui facilite leur conservation sur le long terme [2]. Historiquement, ces fosses ont été employées comme silos souterrains hermétiques pour préserver la qualité nutritionnelle et la capacité germinative des grains, notamment en cas de pénurie alimentaire. Leur principe repose sur une étanchéité à l'air qui limite la détérioration des grains.



Figure 5 : Fosse de réception

I.4.4 Produits stockés

Les produits stockés sont composés essentiellement de blé et de légumes secs.

Le blé est une céréale cultivée pour ses grains. On l'utilise surtout pour faire de la farine, du pain et des pâtes. Il en existe plusieurs types, comme le blé tendre et le blé dur. C'est une des plantes les plus cultivées au monde pour nourrir les humains.

À partir du blé tendre on obtient de la farine. Cette dernière est utilisée dans la fabrication du pain et des biscuits. À partir du blé dur on obtient de la semoule à partir de laquelle on fabrique de la galette, du couscous et des pâtes alimentaires.

Les légumes secs, aussi appelés légumineuses à grosses graines, sont des graines sèches issues exclusivement de plantes de la famille des Fabacées (ou légumineuses), récoltées à maturité après un séchage naturel. Ils se distinguent des légumineuses vertes, qui sont récoltées fraîches, comme les petits pois ou les haricots verts

I.4.5 Equipements

La Coopérative des Céréales et Légumineuses Sèches (CCLS) d'Oran utilise trois catégories d'équipement à savoir les élévateurs, les transporteurs et les dépoussiéreurs.

Le terme « élévateur » désigne couramment un dispositif mécanique destiné à soulever et à transporter des produits agricoles, notamment des céréales, d'un niveau à un autre au sein de l'installation. Ces élévateurs jouent un rôle crucial dans les opérations de stockage, de traitement et de transfert des céréales ainsi que d'autres produits agricoles à travers les différentes zones de l'usine. Différents types d'élévateurs sont employés au sein des coopératives agricoles, notamment les élévateurs à vis et les élévateurs à bande. Ces dispositifs permettent de déplacer efficacement les grains en les soulevant, soit pour leur stockage dans des silos, soit pour leur acheminement vers d'autres équipements destinés à la transformation ou au traitement. Dans ce contexte, l'élévateur joue un rôle central en facilitant les opérations logistiques au sein de la coopérative, en optimisant les flux de produits et en contribuant à l'amélioration de l'efficacité globale du processus de production.

Le terme transporteur désigne un équipement industriel conçu pour le transport horizontal de produits en vrac, notamment des céréales, granulés ou poudres. Il est constitué d'une chaîne tendue qui circule autour de roues dentées aux extrémités de la machine, sur laquelle sont fixées à intervalles réguliers des palettes en acier ou en plastique pour déplacer les produits à l'intérieur d'un canal métallique. Ses caractéristiques principales incluent des débits pouvant atteindre 300 tonnes par heure, des longueurs de transport jusqu'à 60 mètres

et une vitesse standard d'environ 0,5 m/s. Le système comprend des dispositifs de contrôle comme la détection de bourrage et des trappes d'inspection pour faciliter la maintenance.



Figure 6 : Transporteur

Le terme dépoussiéreur désigne un dispositif conçu pour aspirer l'air chargé de poussières et de particules potentiellement nocives générées par les processus industriels. Grâce à des systèmes de filtration spécifiques, tels que des filtres à manches ou à cartouches, il permet de retenir ces contaminants avant de rejeter un air purifié. Cet équipement joue un rôle essentiel dans la protection de la santé des travailleurs, la préservation de l'environnement, ainsi que dans le maintien de la qualité de l'air au sein des zones de production.



Figure 7 : Dépoussiéreur

Chapitre II

Généralités sur la poussière

II.1 Définition de la poussière industrielle

La poussière désigne généralement un ensemble de particules très fines, visibles ou non, présentes dans l'air. La taille de ces particules est mesurée en micromètres (μm), soit des millionièmes de mètre. On considère comme poussières toutes les particules solides dont le diamètre aérodynamique est inférieur ou égal à 100 micromètres, ou dont la vitesse de chute maximale, dans des conditions normales de température, ne dépasse pas 0,25 mètre par seconde. Le terme « poussière industrielle » désigne spécifiquement les particules solides en suspension dans l'air, générées par des procédés mécaniques, chimiques ou thermiques liées aux activités industrielles [3]. Ces particules varient en taille, peuvent être invisibles à l'œil nu ou former des dépôts visibles, et leur composition dépend des matériaux utilisés dans les processus industriels.

II.2 Typologie et classification des poussières

La typologie et la classification des poussières jouent un rôle fondamental dans la prévention des risques industriels, en particulier pour la santé et la sécurité des travailleurs. En identifiant précisément les différents types de poussières selon leur nature et leur niveau de dangerosité - par exemple, les classes L, M et H, qui correspondent respectivement à des poussières faiblement, moyennement ou hautement dangereuses - il devient possible de mettre en place des mesures de protection adaptées et de choisir les équipements de filtration appropriés. Cette démarche permet de limiter l'exposition des opérateurs aux particules nocives et de répondre efficacement aux exigences réglementaires en matière de sécurité au travail. Il existe trois classes de poussières [4], voici comment elles se distinguent les unes des autres [5]:

Classe L : poussières légèrement dangereuses : cette catégorie regroupe les poussières domestiques et certaines substances courantes comme le sable, le plâtre ou la craie. Ces poussières, généralement peu nocives, peuvent se former lors d'opérations telles que le nettoyage de bâtiments. Leur valeur limite d'exposition professionnelle (VLEP) est supérieure à 1 mg/m³.

Classe M : poussières modérément dangereuses : cette classe intermédiaire comprend des poussières issues du bois, des métaux et des particules de peinture. Elles sont fréquemment rencontrées dans les travaux de menuiserie, de peinture ou dans les industries métallurgiques. La VLEP associée est supérieure à 0,1 mg/m³. Les équipements de dépoussiérage doivent garantir une filtration efficace à 99,9 % pour ces poussières.

Classe H : poussières très dangereuses : cette classe regroupe les poussières présentant un risque élevé pour la santé, notamment les substances cancérigènes ou extrêmement toxiques telles que l'amiante, la poussière de plomb, les spores de moisissure, ainsi que certaines poussières fines comme la farine ou des fibres inorganiques. Leur VLEP est inférieure à 0,1 mg/m³. Les dispositifs de filtration doivent assurer un taux de pénétration maximal de 0,005 % pour protéger efficacement les travailleurs.

Une deuxième catégorisation de la poussière est préconisée en fonction de la source primaire de leurs particules industrielles, de leur composition chimique ou de leur taille.

Source primaire des particules industrielles : beaucoup de secteurs traitent des matières premières en poudre ou en granulés (minéraux, métaux, substances organiques). Ces particules sont libérées lors de leur extraction, transport, stockage ou utilisation. Par exemple, on trouve parmi les matériaux : le calcaire, la silice, le verre, l'amiante, les oxydes métalliques, la farine, le bois, le coton, les plastiques et les excréments d'animaux.

Composition chimique : le tableau suivant est une synthèse de la composition chimique typique des poussières industrielles selon leur nature et origine, basé sur les données issues des sources INRS :

Type de poussière industrielle	Composition chimique principale	Exemples d'éléments ou composés	Remarques sur la toxicité ou effets
Poussières minérales	Oxydes, silicates, carbonates	Silice cristalline (SiO_2), carbonate de calcium ($CaCO_3$), alumine (Al_2O_3), oxyde de titane (TiO_2)	Certaines (silice cristalline) sont cancérigènes, d'autres (carbonate de calcium) peu toxiques
Poussières métalliques	Métaux purs ou oxydes métalliques	Fer (Fe), aluminium (Al), cuivre (Cu), zinc (Zn), plomb (Pb), cobalt (Co), tungstène (W)	Certaines sont toxiques ou cancérigènes (plomb, cobalt)
Poussières organiques	Matières carbonées, fibres végétales ou animales	Bois, farine, coton, déjections animales, polymères synthétiques (acétate de polyvinyle, vinylacrylates)	Peuvent provoquer allergies, asthme, inflammations
Poussières chimiques industrielles	Composés variés selon procédé : oxydes, sulfures, chlorures, composés organiques	Sulfure de fer (FeS_2), chlorure de sodium (NaCl), hydrocarbures polyaromatiques (HAP), composés volatils (COV)	Certaines poussières sont inflammables ou toxiques, peuvent contenir des composés cancérigènes

Tableau 1 : Composition chimique des poussières

Taille des poussières industrielles : les particules de poussière industrielle ont généralement une taille qui varie de quelques dizaines de nanomètres (0,01 µm) à 100 µm, cette dernière dimension étant fréquemment reconnue comme le seuil maximal pour définir un aérosol. On distingue différentes fractions en fonction de leur taille, ce qui influence leur capacité à pénétrer dans les voies respiratoires :

- **Particule respirable (de 10 à 100 µm) :** ces particules sont principalement retenues dans les cavités nasales. Exemples : particules de ciment, sable.
- **Fraction thoracique (5 à 10 µm) :** ces particules peuvent pénétrer jusqu'à la trachée, les bronches et les bronchioles. Elles peuvent être rejetées ou ingérées, mais lors d'une exposition intense, elles peuvent parvenir jusqu'aux alvéoles pulmonaires.
- **Fraction alvéolaire (0,5 à 5 µm) :** ces particules extrêmement fines qui se fixent directement sur les alvéoles des poumons, entraînant des conséquences sanitaires plus sévères. Les particules de moins de 0,5 µm ont un comportement similaire à celui d'un gaz et se déplacent dans le corps en fonction de la ventilation pulmonaire [6].

II.3 Sources de poussière dans les industries

Les poussières industrielles proviennent principalement de la manipulation de matières premières en poudre, des procédés mécaniques de transformation, des industries spécifiques, ainsi que des opérations de transport et de stockage [7]. De nombreux secteurs industriels travaillent avec des substances sous forme de poudres ou granulés, générant ainsi des poussières variées :

- **Poussières minérales :** calcaire, silice, verre, amiante, oxydes et composés métalliques divers.
- **Poussières métalliques :** acier au carbone, acier inoxydable, zinc, cuivre, bronze, etc.
- **Poussières organiques :** bois, farine, coton, matières plastiques, déjections animales.

II.4 Risques liés aux poussières

Les poussières industrielles représentent une menace importante à la fois pour la santé des travailleurs et pour la sécurité des installations. Sur le plan sanitaire elles peuvent engendrer divers troubles tels que des affections respiratoires, des réactions allergiques et toxiques ainsi que des pathologies cancéreuses [8].

Affections respiratoires : L'inhalation de poussières fines peut provoquer une irritation des voies respiratoires, entraînant toux, essoufflement, et inflammation des bronches et poumons. À long terme, cette exposition peut causer des maladies chroniques comme la silicose (due à la silice cristalline), l'asbestose (exposition à l'amiante), ainsi que des bronchites chroniques, de l'asthme professionnel et d'autres infections pulmonaires [9]. Les particules les plus fines (< 10 µm) pénètrent profondément dans les poumons, aggravant ces effets. Ce phénomène est une cause majeure de maladies professionnelles reconnues dans plusieurs secteurs industriels.

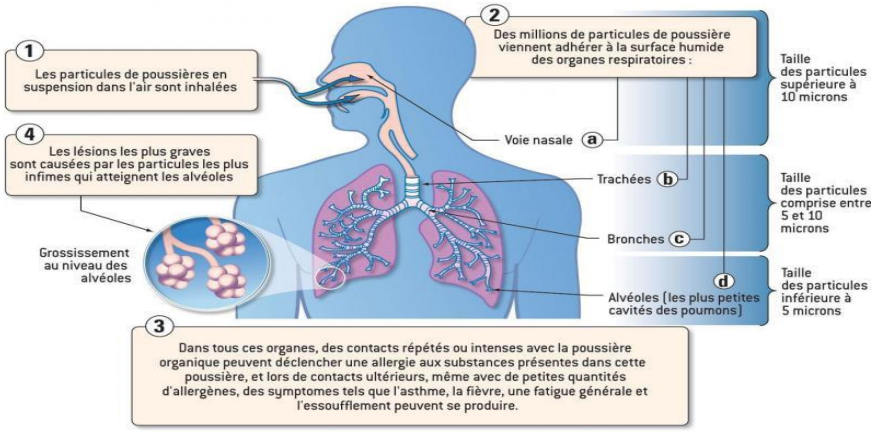


Figure 8 : L'inhalation de poussière

Réactions allergiques et toxiques : Certaines poussières contiennent des substances allergènes, par exemple la farine, qui peut causer de l'asthme lié au travail. D'autres particules peuvent avoir des effets toxiques, neurotoxiques ou immunologiques, selon la composition chimique ou biologique (ex. mercure, béryllium). Ces poussières peuvent aussi fixer des molécules gazeuses nocives présentes dans l'air, augmentant leur toxicité [5]. Les atteintes incluent également des lésions au niveau du nez (rhinites, perforations, cancers nasaux)

Pathologies cancéreuses : Certaines poussières industrielles (notamment celles contenant de l'amiante, du bois ou des métaux lourds) sont reconnues comme cancérogènes par des organismes comme le CIRC. L'exposition prolongée augmente significativement le risque de cancers pulmonaires, nasaux, et des voies respiratoires supérieures.

Sur le plan de la sécurité des installations, la poussière représente un risque certain d'incendie et d'explosion. En effet, les poussières combustibles, comme celles issues de la farine, du sucre, du bois, des métaux (aluminium, magnésium), ou des matières plastiques, peuvent former un nuage explosif (ATEX) en suspension dans l'air dès lors que la concentration atteint un seuil critique, que l'espace est confiné (ex. silo, local fermé) et qu'une source d'inflammation est présente (étincelle, électricité statique, surface chaude). Ce risque d'explosion impose des mesures strictes de contrôle, notamment une ventilation adaptée, la limitation des suspensions de poussières, et des précautions vis-à-vis des sources d'ignition.



Figure 9 : Explosion de silos

Une atmosphère explosive (ATEX) est un mélange avec l'air, dans les conditions atmosphériques, de substances inflammables sous forme de gaz, vapeurs ou poussières dans lequel, après inflammation, la combustion se propage à l'ensemble du mélange non brûlé.

La définition des zones à risques d'explosion retenue pour cette étude est celle relative aux poussières, donnée par l'arrêté du 8 juillet 2003 relatif à la protection des travailleurs susceptibles d'être exposés à une atmosphère explosive. Ces zones sont définies en fonction de la nature, de la fréquence ou de la durée de l'atmosphère explosive comme illustré par le tableau 2.

NATURE	DEFINITION
ZONE 20 Risque Permanent	Emplacement où une atmosphère explosive sous forme de nuage de poussières combustibles, est présente dans l'air en permanence pendant de longues périodes ou fréquemment
ZONE 21 Risque Occasionnel	Emplacement où une atmosphère explosive sous forme de nuage de poussières combustibles, est susceptible de se présenter occasionnellement en fonctionnement normal
ZONE 22 Risque minime	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, elle n'est que de courte durée

Tableau 2 : Zonage d'atmosphère explosive poussiéreuse

II.5 Normes et réglementations en matière de poussières

Les poussières industrielles sont régulées par des décrets pour protéger la santé des travailleurs et la sécurité des installations

Le **décret exécutif n° 93-165 du 10 juillet 1993** réglemente les émissions atmosphériques de fumées, gaz, poussières, odeurs et particules solides provenant des installations fixes [10]. Il fixe les valeurs limites des rejets atmosphériques, impose la conception des installations pour éviter ou réduire les émissions à la source, et prévoit des mesures de contrôle et de surveillance des rejets. Les poussières doivent être captées à leur source et évacuées vers l'extérieur sans risque de pollution.

Le **décret exécutif n° 91-05 du 19 janvier 1991** concerne l'hygiène et la sécurité en milieu de travail. Il stipule que les poussières et dégagements d'émanations doivent être captés à leur source et évacués vers l'extérieur [11], notamment dans les travaux en espaces fermés, avec une ventilation appropriée assurant le renouvellement d'air pendant toute la durée des travaux

II.6 La poussière des céréales et des légumes secs

La poussière des céréales et des légumes secs se compose de particules fines générées lors de la manipulation, du transport ou du traitement de ces denrées agricoles. Cette poussière est constituée principalement de fragments d'enveloppes, de grains broyés, de fibres végétales, de spores fongiques et parfois de contaminants biologiques comme les bactéries ou les mycotoxines [12]. Sa granulométrie varie généralement de quelques micromètres à plusieurs dizaines de micromètres, ce qui lui permet d'être facilement mise en suspension dans l'air des installations agricoles ou industrielles.

II.6.1 Sources de poussière des céréales et des légumes secs

- **Opérations mécaniques et manipulations physiques**

Les poussières proviennent essentiellement des opérations de récolte, de tri, de nettoyage, de broyage, de transfert, et de stockage des céréales et légumes secs. Chaque étape mécanique génère des particules fines par friction, choc, écrasement, ou chute des grains. Le broyage et le décorticage sont particulièrement sources de poussière, car ils fragmentent la matière en particules très fines capables de se disperser facilement dans l'air des installations [13]. Le transport par convoyeurs ou camions participe aussi à la dégradation mécanique des grains, augmentant la poussière émise.

- **Propriétés physiques des grains et légumineuses**

La structure des grains, leur fragilité et leur teneur en humidité influencent la quantité de poussière produite. Des grains secs, fragiles ou abîmés libèrent plus de poussière qu'un produit sain et légèrement humidifié. Les légumineuses, souvent riches en fibres et plus cassantes, peuvent libérer une poussière plus importante lors du traitement.

- **Facteurs biologiques et chimiques**

Les insectes, moisissures et autres micro-organismes présents sur ou dans les grains dégradent la matière organique, favorisant la fragmentation et l'aérosolisation des poussières.

Par ailleurs, une mauvaise conservation (avec humidité ou température élevées) accélère ces phénomènes biologiques, augmentant la poussière et les risques de contamination sanitaire.

- **Impuretés et matières étrangères :**

La poussière inclut aussi des impuretés comme des fragments de paille, enveloppes, résidus végétaux, insectes morts et fragments d'insectes, poussières accumulées dans les silos, ou encore des particules provenant des sols et du matériel de manutention.

II.6.2 Risques liés aux poussières des céréales et des légumes secs :

- **Pathologies respiratoires :**

Les poussières inhalables provenant des céréales et légumes secs se composent de particules fines qui peuvent atteindre différentes profondeurs dans les voies respiratoires selon leur taille. Les particules dites "thoraciques" (<10 µm) pénètrent jusqu'aux bronches, pouvant provoquer des bronchites chroniques et de l'asthme professionnel. Les particules plus fines encore, dites "alvéolaires" (<4 µm), peuvent atteindre les alvéoles pulmonaires, induisant des maladies plus graves comme la broncho-pneumopathie chronique obstructive (BPCO), La fibrose pulmonaire, des pneumopathies d'hypersensibilité (connues sous le nom de « poumon du fermier »), et dans certains cas, augmenter le risque de cancers professionnels.

- **Effets toxiques et allergènes :**

Les poussières de céréales contiennent des bioaérosols composés de spores de moisissures, de bactéries (notamment Gram négatif), d'endotoxines bactériennes, de fragments d'insectes, ainsi que des mycotoxines — substances toxiques produites par certains champignons. Ces éléments peuvent déclencher des réactions allergiques sévères, des inflammations immunitaires chroniques, des intoxications, et aggravent les atteintes respiratoires. Les expositions répétées favorisent la survenue d'asthmes, de rhinites allergiques et d'atteintes bronchiques chroniques[5].

- **Risque d'explosion :**

Au-delà des effets sanitaires, les poussières de céréales sont hautement inflammables. Leur concentration dans l'air peut atteindre un seuil critique où un point chaud ou une étincelle déclenche une explosion destructive dans les silos, les entrepôts, ou les zones de manutention. Ce risque interdit toute négligence dans le contrôle de la poussière, imposant des mesures de ventilation, d'élimination régulière des poussières accumulées, et des procédures de sécurité strictes pour éviter toute source d'inflammation[14].

II.6.3 Impacts des poussières des céréale et des légumes secs

- **Impacts sanitaires et sociaux :**

- **Altération de la qualité de vie des travailleurs :**

L'exposition quotidienne aux poussières entraîne une augmentation des maladies respiratoires chroniques (bronchite, asthme professionnel, pneumopathies d'hypersensibilité) qui aboutissent à un fort taux d'absentéisme, une baisse de la productivité et des répercussions négatives sur la vie familiale et sociale des travailleurs. Ces maladies provoquent fatigue, limitations respiratoires et pertes d'aptitude professionnelle, contribuant à un stress psychosocial important.

- **Surmortalité professionnelle :**

Certains professionnels agricoles fortement exposés aux poussières organiques développent des pathologies pulmonaires graves, réduisant globalement leur espérance de vie. Ces effets peuvent s'aggraver sans prise en charge médicale adéquate. La littérature rapporte une surmortalité liée aux maladies respiratoires professionnelles, incluant BPCO et cancers professionnels associés à l'exposition prolongée.

- **Impacts sur la sécurité alimentaire et la qualité des produits :**

- **Contamination des grains :**

La poussière transporte des spores de moisissures, notamment des champignons producteurs de mycotoxines (aflatoxines, ochratoxines), qui altèrent la qualité nutritionnelle, le goût, l'odeur et la capacité germinative des grains. La contamination fongique peut aussi provoquer des pertes importantes par dégradation du grain.

- **Dépréciation économique :**

Les lots qui présentent un fort taux de poussière ou de contamination microbienne sont souvent déclassés, voire éliminés, ce qui génère d'importantes pertes économiques pour les producteurs et les distributeurs. Les coûts liés au nettoyage, à l'amélioration des conditions de stockage et à la prévention sanitaire augmentent également.

- **Impacts environnementaux :**

- **Pollution atmosphérique locale :**

La dispersion de poussières dans l'atmosphère autour des entrepôts, silos ou zones de manutention conduit à une pollution de l'air locale. Cette pollution peut affecter la santé des riverains et nuire à la biodiversité locale, en particulier à la végétation, en bloquant la photosynthèse ou en déposant des contaminants organiques et minéraux.

- **Propagation de contaminants**

Les particules en suspension peuvent transporter des résidus de pesticides, d'engrais ou d'autres polluants utilisés dans la production agricole. La chute de ces poussières sur le sol ou dans les systèmes aquatiques peut provoquer une contamination des écosystèmes, avec des impacts sanitaires pour les animaux et les humains exposés.



Figure 10: Impacts environnementaux de la poussière

Chapitre III

Techniques et technologies de dépoussiérage

III.1 Technologies et enjeux du dépoussiérage en industrie

Le dépoussiérage est une étape cruciale pour garantir la qualité, la sécurité et la productivité dans les environnements de production. Il consiste à éliminer efficacement les poussières et particules générées par les activités industrielles. La maîtrise de l'empoussièrement repose sur plusieurs techniques et mesures visant à limiter la production, la diffusion et l'accumulation des poussières [15]. Ces mesures ont pour but de protéger la santé des opérateurs, d'éviter les risques d'explosion et d'assurer la qualité de l'air en milieu de travail.

Sur le plan technologique, les systèmes de dépoussiérage intègrent des équipements sophistiqués tels que des filtres à manches, cycloniques, à cartouches et systèmes d'aspiration centralisés, conçus pour capter et filtrer les particules à la source. Le choix, le dimensionnement et l'installation de ces équipements sont essentiels pour optimiser la capture des poussières et assurer un environnement de travail sain, conforme aux normes réglementaires en vigueur [16].

III.2 Equipements de filtration

La filtration de l'air est essentielle dans l'industrie céréalière et les minoteries pour éliminer les poussières générées lors du tri, du comptage et de la manipulation des graines. Ces poussières, d'origine végétale, minérale ou chimique, peuvent causer des problèmes respiratoires, des irritations, des allergies et des intoxications, tout en posant des risques d'explosion et d'incendie dans les atmosphères confinées comme les silos [17]. Des systèmes de dépoussiérage efficaces sont donc nécessaires pour assainir l'environnement de travail, protéger la santé des opérateurs et se conformer à la réglementation ATEX. Plusieurs types filtration existe, notamment le filtre cyclonique, le filtre a manche et le filtre a cartouche.

III.1.1 Le filtre cyclonique

Le filtre cyclonique, ou séparateur cyclonique, est un dispositif de filtration utilisé dans de nombreux secteurs industriels pour séparer les particules solides (poussières, fibres, particules métalliques ou minérales) d'un flux d'air ou de gaz chargé. Sa structure circulaire favorise la formation d'un tourbillon d'air : l'air chargé de particules entre tangentiellement dans le cyclone, ce qui crée un mouvement hélicoïdal [18]. La force centrifuge projette les particules les plus lourdes contre les parois du cyclone, où elles sont ensuite récupérées par

gravité au fond de l'appareil, tandis que l'air filtré s'échappe par le sommet [19]. Son principe de fonctionnement peut être résumé ainsi :

- L'air ou le gaz chargé de particules est introduit tangentiellement dans la chambre cylindrique du cyclone
- Le flux d'air suit un mouvement spiralé descendant : la force centrifuge expulse les particules lourdes vers la paroi.
- Les particules tombent dans un réservoir collecteur par gravité.
- L'air ou le gaz épuré remonte au centre du cyclone et sort par un conduit supérieur.
- Ce système fonctionne sans pièces mobiles, ce qui réduit la maintenance et le risque de panne mécanique (voir figure 11).

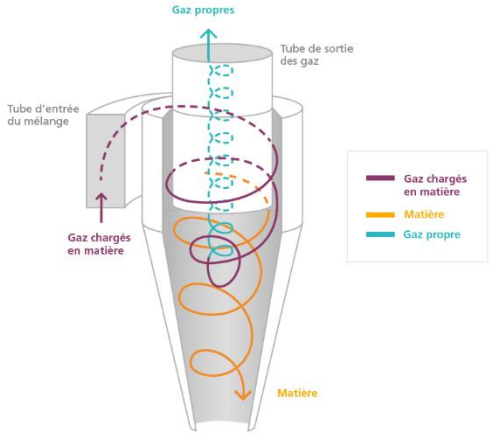


Figure 11 : Cyclone industriel

Parmi les avantages de filtres cycloniques [tableau 3] on peut citer :

- Son efficacité élevée : jusqu'à 98-99 % pour les particules de plus de 5 à 10 microns.
- Son adaptabilité : utilisation continue, traitement de grands volumes d'air ou de liquide.
- Sa robustesse : supporte des conditions sévères (température, corrosion)

Taille des particules	Efficacité d'élimination
>10microns	99.9
5-10microns	95-99
3-5microns	90-95

Tableau 3 : Efficacité des filtres cycloniques

Néanmoins le filtre cyclonique présente quelques limites :

- il est moins efficace pour les particules très fines (< 3 microns).
- il peut nécessiter un prétraitement ou un post-traitement pour atteindre les normes les plus strictes de filtration de l'air.
- sa performances dépend de la conception (dimensions, débit, conditions d'exploitation)

III.1.2 Les filtres à manches :

Les filtres à manches sont des systèmes spéciaux utilisés pour le dépoussiérage de l'air basé sur le passage du polluant à travers des surfaces filtrantes réalisées pour être perméables aux gaz mais retenir les particules et même les granulés de poussière extrêmement fins. Plus simplement, les polluants pénètrent dans le filtre et tombent sur une série de manches qui retiennent toutes les substances non appropriées, telles que les particules et les poussières. Les filtres à manches sont particulièrement adaptés aux zones de dépoussiérage industriel [20]. Son principe de fonctionnement peut être résumé ainsi :

- Les filtres à manches sont généralement composés de plusieurs manches filtrantes disposées dans une chambre de filtration. L'air chargé de poussière entre dans cette chambre et passe à travers les manches, où les particules sont piégées.
- Au fur et à mesure que les particules s'accumulent sur les manches, un système de nettoyage est nécessaire pour maintenir l'efficacité du filtre. Cela peut se faire par des jets d'air comprimé qui délogent les particules accumulées, permettant ainsi leur chute dans un réceptacle. (Voir figure 12)

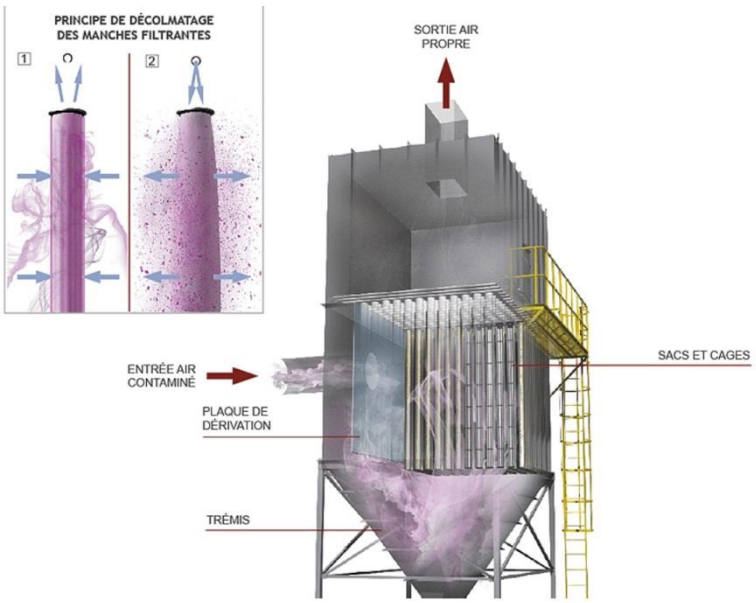


Figure 12 : Dépoussiéreur filtres à manches

Parmi les avantages du filtre à manches on peut citer :

- son efficacité : Les filtres à manches peuvent atteindre des niveaux de filtration très élevés, capturant même les particules les plus fines. Cela les rend idéaux pour des applications où la qualité de l'air est cruciale.
- son coût modéré : En général, les filtres à manches ont un coût unitaire inférieur par rapport à d'autres systèmes de filtration, comme les filtres à cartouche, ce qui les rend économiquement attractifs pour de nombreuses industries.
- sa polyvalence : Il peut être utilisé dans une variété d'industries, y compris la métallurgie, l'agroalimentaire, et la chimie, pour traiter différents types de poussières et de particules.

Néanmoins le filtre cyclonique présente quelques limites :

- il nécessite un entretien régulier pour restaurer ses performances à cause de l'accumulation des particules sur les manches
- il est peu adapté à l'utilisation des poussières fibreuses ou humides en raison du colmatage rapides du tissu filtrants

Les filtres à manches sont utilisés dans de nombreux secteurs, notamment :

- **en industrie alimentaire** pour contrôler les émissions de poussière lors de la transformation des céréales et d'autres produits alimentaires.
- **en métallurgie** : dans les aciéries, où ils aident à capturer les particules générées lors de la fusion des métaux.
- **en cimenteries** pour réduire les émissions de poussière lors de la production de ciment, contribuant ainsi à la protection de l'environnement et à la santé des travailleurs

III.1.3 Le filtre à cartouche

Les filtres à cartouches sont des dispositifs de filtration industrielle composés d'éléments cylindriques remplaçables (cartouches), conçus pour capturer les particules solides dans des flux gazeux ou liquides. Son principe de fonctionnement peut être résumé ainsi [21]:

- l'air ou le liquide contaminé traverse la cartouche, où les particules sont piégées à la surface ou en profondeur selon le média utilisé
- des jets d'air comprimé délogent les particules accumulées, permettant une régénération périodique sans interruption du processus.

Il existe deux Types de Cartouches à savoir les cartouches de filtration de surface et les cartouches de filtration en profondeur.

Les cartouches de filtration de surface captent les contaminants sur leur surface extérieure. Une fois que la surface du filtre est obstruée par des particules, elle ne peut plus fonctionner efficacement, ce qui signifie que ces types de filtres ont souvent une durée de vie plus courte. Même si les filtres de surface peuvent parfois être rincés à l'eau ou à l'air comprimé pour être réutilisés, cette méthode n'est pas toujours efficace.

Les cartouches de filtration en profondeur sont conçues pour retenir plus de contaminants et prolonger le temps entre les nettoyages, car les impuretés sont piégées dans la matrice filtrante en fonction de la taille des particules. Ce type de filtre dure généralement plus longtemps et conserve mieux sa précision de filtration que les filtres de surface.

Parmi les avantages du filtre à cartouche on peut citer :

- sa haute efficacité de filtration notamment pour les particules fines
- son intégration d'un mécanisme de nettoyage automatique par impulsion d'air comprimé
- sa simplicité pour le remplacement des cartouches.

Néanmoins le filtre à cartouche présente quelques limites :

- son cout d'utilisation élevé, notamment en raison de la fréquence de remplacement des cartouches
- ses filtres nécessitent souvent un prétraitement du fluide car la présence de grosses particules peut provoquer un colmatage rapide des cartouches réduisant leur durée de vie.

III.3 Systèmes d'aspiration

L'aspiration vise à capter la poussière directement à la source d'émission. Ce système est crucial pour protéger la santé des travailleurs contre les poussières fines potentiellement explosives et améliorer la qualité de l'air. Les solutions professionnelles incluent des systèmes d'aspiration mobiles ou centralisés, des bras d'aspiration adaptés, voire des hottes fixées au-dessus des zones de travail, tous reliés à des filtres pour séparer les poussières de l'air. Ces systèmes peuvent être certifiés ATEX selon le contexte [22].

Les hottes sont des dispositifs conçus pour capter et extraire efficacement les fumées, vapeurs, graisses, poussières ou polluants directement à la source de leur émission au-dessus des zones de travail. Elles sont généralement fabriquées en acier inoxydable, un matériau privilégié pour sa durabilité, sa résistance à la corrosion et sa facilité d'entretien dans des environnements exigeants. L'installation doit être réalisée par des professionnels qualifiés afin de garantir une étanchéité optimale et une conformité aux normes de sécurité et d'hygiène. De plus, l'entretien régulier des filtres et de la hotte est indispensable pour maintenir ses performances et la sécurité de l'installation.



Figure 13 : Hottes industrielles

III.4 Maintenance préventive

La maintenance préventive est une étape cruciale pour limiter les émissions de poussière, prévenir les risques d'explosion et assurer la sécurité et la santé des travailleurs. Elle englobe plusieurs phases allant de l'entretien des équipements à l'inspection et maintenance périodique [23].

- **Entretien régulier et rigoureux des équipements de manutention, nettoyage et convoyage**

Il est essentiel de maintenir en bon état les installations pour éviter toute fuite ou dispersion accidentelle de poussières. Cela comprend la vérification quotidienne et périodique des joints d'étanchéité, des portes, et des points d'accès, qui doivent rester fermés pendant le fonctionnement normal [24]. Une bonne étanchéité réduit les fuites de poussière dans l'air ambiant. L'entretien comprend aussi la lubrification, le réglage, et la réparation immédiate des pièces usées ou défectueuses.

- **Entretien méticuleux des installations électriques en zones ATEX**

Les zones où les poussières peuvent former des atmosphères explosives nécessitent une attention particulière. Les installations électriques doivent être conformes aux normes ATEX, régulièrement inspectées pour détecter tout risque d'étincelle, surchauffe, ou dégradation [25]. Tout équipement non conforme ou mal entretenu augmente significativement le risque d'incendie ou explosion.

- **Inspection et maintenance périodiques des systèmes d'aspiration et dépoussiérage**

Les filtres à manches, cyclones, et systèmes d'aspiration doivent être régulièrement nettoyés et contrôlés pour assurer leur efficacité maximale. Un filtre encrassé ou un pan de système défaillant diminue la capacité de captage des poussières, augmentant ainsi leur diffusion dans l'environnement. Un planning de maintenance documentée avec changement périodique des filtres et nettoyage mécanique est recommandé [26]. Les conduits d'extraction doivent rester libres de poussière et condensats pour ne pas obstruer les flux d'air.

III.5 Formation des travailleurs

Une formation de qualité doit être fournie aux travailleurs pour les sensibiliser aux dangers liés à la poussière, notamment les risques respiratoires (irritations, asthme professionnel), allergiques, et les risques d'explosion liés aux atmosphères explosives générées par les poussières combustibles [27]. Cette connaissance est fondamentale pour justifier les mesures de prévention et comportements sécuritaires.

La formation doit inclure l'apprentissage de l'utilisation correcte des masques filtrants (type FFP2 ou FFP3 selon le niveau d'exposition) et des vêtements de protection. L'opérateur doit savoir comment ajuster, porter, entretenir et remplacer les EPI pour garantir leur efficacité. Ces équipements limitent l'inhalation des poussières fines. Les travailleurs doivent maitriser les procédures d'urgence en cas de fuite, déversement, ou incident lié aux poussières, ainsi que les premiers secours et mesures d'incendie spécifiques. L'information sur les risques selon les fiches de données de sécurité (FDS) des produits manipulés est aussi communiquée.

La formation doit être assurée par un organisme agréé, renouvelée régulièrement pour intégrer les nouvelles exigences réglementaires ou retours d'expérience. Elle s'inscrit dans un cadre réglementaire incluant l'analyse des risques, l'élaboration du Document Unique d'Évaluation des Risques (DUER), et la mise en place des mesures de prévention collective.

III.6 Aménagement des postes de travail

L'aménagement des postes de travail vise à réduire l'exposition directe des opérateurs aux poussières en combinant des dispositifs techniques, une organisation ergonomique et des mesures de sécurité [28].

- **Implémentation de systèmes d'aspiration localisée à proximité immédiate des points d'émission**

Il s'agit d'installer des hottes et des systèmes aspirants directement au-dessus ou au plus près des sources de poussière. Ces systèmes captent les poussières fines au moment où elles sont émises, limitant ainsi leur dispersion dans l'air ambiant. Ils sont souvent reliés à des circuits de dépoussiérage comprenant cyclones et filtres spécialisés permettant de récupérer efficacement les particules explosives. L'aspiration est asservie à la mise en marche des équipements pour une efficacité maximale. Ce procédé diminue la concentration de poussière respirable autour des opérateurs et réduit le risque d'explosion.

- **Organisation ergonomique des postes pour limiter l'exposition directe des opérateurs**

L'aménagement spatial est conçu pour éloigner les travailleurs des flux d'air potentiellement contaminés. Cela peut inclure le positionnement des zones de travail hors des trajectoires des poussières, ainsi que la mise en place d'un flux d'air tempéré et homogène à basse vitesse pour évacuer doucement les poussières loin du visage des opérateurs. Des interfaces ergonomiques facilitent les gestes professionnels tout en minimisant la manutention manuelle et la production de poussière. La conception prend en compte la facilité d'accès pour les opérations tout en réduisant l'exposition.

- **Mise en place de barrières physiques et de signalisation pour délimiter les zones à risque et contrôler les accès :**

Des barrières physiques temporaires ou permanentes, telles que des écrans, portes coupe-feu ou cloisons transparentes, séparent les zones à haute concentration de poussière du reste de l'atelier. Ces dispositifs empêchent la dispersion des poussières dans d'autres secteurs et limitent l'accès aux seuls personnels formés et protégés.

La signalisation claire, notamment des panneaux normalisés indiquant les risques d'explosion et d'exposition aux poussières, informe et rappelle les procédures de sécurité. Les consignes de port d'équipement de protection individuelle (EPI) obligatoire et d'accès restreint sont visibles aux points d'entrée.

III.7 Les équipements de protection individuelle

Les équipements de protection individuelle (EPI) contre la poussière doivent être choisis en fonction du niveau d'exposition et des risques spécifiques liés à ces poussières [29].

- **Protection respiratoire**

Le port de masques filtrants est crucial pour empêcher l'inhalation des poussières qui peuvent provoquer irritations des voies respiratoires supérieures, symptômes bronchiques et diminution de la fonction pulmonaire. La sélection du masque FFP2 ou FFP3 dépend du degré d'exposition et de la nature de la poussière.

Le masque FFP2 offre une filtration d'au moins 94% des particules fines. Il est adapté aux poussières fines présentes lors d'activités comme le ponçage de bois ou de peinture, le meulage, le sablage, et les pulvérisations.

Le masque FFP3 est le plus filtrant, arrêtant au moins 99% des particules, recommandé pour les poussières très fines et plus dangereuses, comme l'amiante, les fibres céramiques, certaines fumées métallurgiques, virus et bactéries. Il est indispensable dans les environnements à haute toxicité ou contamination, comme lors de désamiantage, traitement de déchets médicaux, ou combats contre des agents biologiques (virus, bactéries).



Figure 14 : Type de masque

- **Protection cutanée**

Les poussières peuvent provoquer des irritations cutanées ou des réactions allergiques lors d'un contact prolongé. Le port de vêtements de protection adaptés est donc recommandé. Les combinaisons couvrantes, gants en matériaux comme le nitrile ou le latex assurent une barrière efficace contre le contact direct avec les poussières. L'équipement doit être choisi selon le type de tâche et ajusté pour assurer une liberté de mouvement tout en limitant l'exposition cutanée.



Figure 15 : Protection cutanée

- **Protection des yeux et du visage**

Lors des opérations générant un volume important de poussières (nettoyage, manutention, broyage) ou en situation d'urgence, il est conseillé de porter des lunettes de protection ou un écran facial complet pour prévenir l'irritation oculaire. Ces protections doivent être confortables, antibuée, et résistantes pour permettre un travail efficace sans risque de blessure. Parfois, dans les environnements très poussiéreux, le port d'un masque complet recouvrant aussi la face peut être nécessaire



Figure 16 : Protection oculaire

III.8 Panneaux de signalisation

Les panneaux de signalisation et consignes de sécurité jouent un rôle crucial en termes de sécurité des opérateurs. Les panneaux doivent être clairement visibles, placés aux entrées des zones à risque, ainsi qu'aux points stratégiques comme les postes de travail, les zones de stockage ou de manutention [30]. Ils rappellent la nature des risques (incendie, explosion, toxicité de poussières), les consignes obligatoires (port des masques FFP2/FFP3, combinaisons, gants, lunettes), et les comportements interdits (interdiction de fumer, d'utiliser des flammes nues, vigilance maximale sur les sources d'ignition). Les recommandations de l'INRS sur la signalisation de sécurité au travail précisent les dimensions, couleurs, pictogrammes et inscriptions à utiliser pour assurer une bonne compréhension universelle et rapide des messages [25,30]. Il est recommandé aussi d'ajouter des consignes spécifiques pour les opérations de ménage et d'entretien, soulignant l'importance de limiter l'accumulation de poussières sur les surfaces et équipements.



Figure 17 : Panneau de signalisation

Les zones à atmosphère explosive (ATEX) doivent être délimitées par une signalisation spéciale conforme à la directive européenne ATEX 99/92/CE, mentionnant clairement la classification de la zone (Zone 20, 21 ou 22 selon la fréquence de la présence d'atmosphères explosives). Ces panneaux incluent des pictogrammes d'explosion, l'interdiction des sources d'ignition et rappellent les protections obligatoires applicables (équipements antidéflagrants, interdiction d'outils non certifiés, procédures d'intervention spécifiques) [31]. D'autres zones sensibles, comme les espaces confinés ou locaux électriques, peuvent aussi faire l'objet d'une signalisation adaptée pour alerter sur les risques spécifiques associés (manque d'oxygène, risques d'électrocution). La signalisation doit être implantée à toutes les entrées des zones ATEX ainsi qu'à l'intérieur, notamment aux abords des équipements électriques, des silos, convoyeurs, et systèmes de dépoussiérage.



Figure 18 : Risque ATEX

Chapitre IV

Études de cas (l'entreprise CCLS)

IV.1 Sources de poussière dans le processus de stockage

Les sources de poussière dans le processus de stockage des grains sont nombreuses et variées, avec des contributions spécifiques selon chaque étape et équipement utilisé. L'émission des poussières est effectuée à différents niveaux du processus de stockage [32].

- **Réception et expédition des grains (80 à 90% des poussières)**

Lors du déchargement des camions vers les fosses de réception, la chute libre des grains génère une importante turbulence d'air qui soulève la poussière. Le chargement des silos et camions via vis à grain ou goulottes provoque aussi des émissions, notamment quand le grain tombe sur une surface ou dans un flux d'air.

- **Systèmes de manutention intermédiaires (jambe d'élévateur, convoyeurs, vis à grain)**

Ces équipements déplacent les grains entre différents points (fosses, silos, camions), générant poussière par frottement entre grains et avec les surfaces. La poussière échappe par les points de jonction et les joints non étanches. La chute de grains dans les convoyeurs crée aussi des émissions.

- **Silos et cellules de stockage**

Même si le stockage lui-même produit moins de poussière (environ 10%), les moments de chargement et déchargement des silos génèrent des poussières. L'aération des silos nécessaire pour maintenir la qualité du grain déplace aussi la poussière via les bouches d'aération.

- **Séchage des grains**

Les séchoirs à grain émettent de la poussière principalement via leurs ventilateurs qui déplacent de grandes quantités d'air chargé en matière fine (jusqu'à 10% des poussières totales).

- **Qualité du grain et conditions de récolte**

La quantité de poussière varie selon la teneur en eau du grain (plus humide, plus de poussière lors de la manipulation) et le type de grain (par ex. particules de rafles de maïs). Les méthodes et conditions de récolte influencent aussi la quantité de poussière présente.

IV.2 Identification des risques

Plusieurs risques ont été identifié allant des risques d'explosion et d'incendie au risques sanitaires en passant par les risques mécaniques liés aux équipements

- **Risques d'explosion et d'incendie dus aux poussières combustibles**

Les poussières issues du stockage et de la manutention des céréales et légumes secs sont organiques, fines et combustibles. En suspension dans l'air, elles peuvent former des nuages explosifs. L'auto-échauffement des grains (notamment dû à la fermentation aérobie ou anaérobie en cas de stockage humide) peut entraîner une montée de température. Si elle n'est pas maîtrisée, cela peut déclencher un incendie ou une explosion par inflammation des poussières en suspension. Pour qu'une explosion de poussière se produise, il faut la conjonction de poussière combustible en suspension à concentration suffisante, comburant (l'oxygène de l'air), confinement partiel ou total (ex. silo, conduit), source d'ignition (étincelle, surface chaude) [33]. Depuis 2005, il y a eu au moins 579 accidents enregistrés impliquant des silos bois et céréales, dont 304 accidents uniquement dans les silos de céréales.

- **Risques sanitaires liés à l'exposition des travailleurs aux poussières fines**

L'inhalation de poussières fines organiques peut provoquer irritations, allergies, bronchite chronique, voire asthme professionnel. La présence de contaminants (moisissures, bactéries) peut aggraver ces effets [34].

- **Risques liés aux déchets et accumulations de poussière**

Les dépôts de poussières sur les surfaces, conduits et équipements représentent des sources potentielles d'explosions secondaires si non nettoyés régulièrement. La limite recommandée est de ne pas dépasser 3 mm d'accumulation [35].

- **Risques mécaniques liés aux équipements (élévateurs, convoyeurs)**

Les pièces mécaniques en mouvement peuvent générer des étincelles ou points chauds, sources potentielles d'inflammation des poussières.

IV.3 Évaluation des risques

Dans le cadre de l'évaluation des risques liés à la poussière des grains nous suggérons l'utilisation de deux méthodes d'analyse des risques à savoir la méthode AMDEC et la méthode HAZOP [36].

- La méthode AMDEC est une approche structurée et proactive pour analyser et évaluer les risques dans une entreprise, notamment dans un contexte industriel tel que le stockage des céréales et légumes secs. Elle permet d'identifier les défaillances potentielles d'un système ou processus, d'évaluer leurs conséquences et de prioriser les actions correctives. Dans l'approche AMDEC, on commence par identifier les fonctions des équipements/processus, puis identifier les modes de défaillance possibles (ex. fuite de poussière, encrassement du filtre, émission excessive de poussière). Une phase d'analyse est ensuite effectuée pour décrire les conséquences possibles pour chaque mode de défaillance (ex. pollution de l'air, risque d'explosion, danger pour la santé des travailleurs). Enfin, Pour chaque défaillance, trois critères sont évalués à savoir la gravité (G) qui correspond à l'impact en cas de défaillance (de 1 faible à 10 grave), L'occurrence (O) qui correspond à fréquence probable d'apparition (de 1 rare à 10 fréquente) et la détection (D) qui correspond à la capacité actuelle à détecter la défaillance avant qu'elle ne cause un problème (de 1 très détectable à 10 non détectable). Ces échelles sont essentielles pour évaluer et prioriser les risques en AMDEC selon la norme CEI 60812 telles qu'illustrés par les tableaux 4, 5 et 6 relatifs aux critères G, O et D.

Gravité (G)	Description (Effet)
1	Négligeable, sans conséquence réelle
2	Mineur, peu visible, sans impact sur la sécurité ou la fonction
3	Modéré, légère dégradation de la fonction, pas d'impact sur la sécurité
4	Notable, réduit la performance mais ne cause pas d'arrêt
5	Significatif, affecte la fonction principale, nécessite une intervention
6	Grave, dégradation importante de la fonction, risque d'incident léger
7	Très grave, impact sur la sécurité ou risques de dommages matériels importants
8	Critique, risques de blessure grave ou dommage sévère au système
9	Extrêmement critique, risque de défaillance majeure avec conséquences graves
10	Catastrophique, défaillance conduisant à un arrêt total ou accident majeur

Tableau 4 : Echelle des gravités

Occurrence (O)	Description
1	Défaillance quasi impossible ou extrêmement rare
2	Très faible fréquence, défaillance exceptionnelle
3	Faible fréquence, peu probable mais possible
4	Modérée, événement quelquefois rencontré
5	Moyenne fréquence, défaillance occasionnelle
6	Fréquence élevée, défaillance régulière
7	Très fréquente, défaillance récurrente
8	Très élevée, défaillance probable à chaque opération
9	Quasi certaine, défaillance presque assurée
10	Fréquente et systématique, défaillance presque inévitable

Tableau 5 : Echelle des occurrences

Détection (D)	Description
1	Détection quasi certaine avant la défaillance, contrôle très efficace
2	Détection très probable par système de contrôle
3	Détection probable par système ou inspection normale
4	Détection possible avec effort, mais fiable
5	Détection difficile mais possible
6	Détection peu probable avec méthodes existantes
7	Très difficile à détecter, faible espoir de détection
8	Détection très improbable avec les moyens actuels
9	Détection quasi impossible, très faible chance
10	Indétectable avant défaillance

Tableau 6 : Echelle des détections

Le RPN permet de hiérarchiser les risques, plus il est élevé, plus la défaillance est prioritaire à traiter. Sa formule est donnée par :

$$RPN = G \times O \times D$$

Le tableau 7 illustre les actions recommandées à effectuer en fonction des valeurs du RPN.

Valeur RPN	Niveau de risque	Action recommandée
< 100	Faible	Surveillance normale, interventions mineures ou non prioritaires
101 à 200	Modéré	Actions correctives planifiées, attention recommandée
> 200	Elevé	Intervention prioritaire, actions correctives urgentes

Tableau 7 : Seuils critiques du RPN

L'approche AMDEC préconise de planifier des mesures pour réduire la gravité, diminuer la probabilité d'occurrence ou améliorer la détection des défaillances. Le tableau ci-dessous illustre les actions correctives prioritaires à effectuer en fonction des équipements/opérations mis en jeu et de la valeur du RPN.

Fonction	Mode de défaillance	Effet(s) principal(aux)	G	O	D	RPN	Actions correctives prioritaires
Système dépoussiérage	Encrassement filtres	Diffusion poussières, risque explosion	8	5	6	240	Maintenance régulière, filtres auto-nettoyant, capteurs pression
Convoyeurs et élévateurs	Surchauffe moteur, étincelle	Déclenchement incendie/explosion	10	3	4	120	Equipements certifiés ATEX, surveillance thermique, arrêt automatique
Silo de stockage	Auto-échauffement grain	Incendie, explosion	10	4	7	280	Contrôle température humidité, ventilation, alarme précoce
Gestion des déchets de poussières	Remise en suspension des poussières	Explosion secondaire	9	4	8	288	Stockage hermétique, élimination régulière, procédures nettoyage sécurisées
Procédures de nettoyage	Nettoyage inapproprié (air comprimé)	Dispersion poussière élevée	7	6	5	210	Formation personnel, interdiction air comprimé, usage aspiration

Tableau 8: AMDEC pour le stockage des céréales

➢ La méthode HAZOP est une démarche collective et systématique qui consiste à décomposer une installation ou un processus en sous-systèmes appelés nœuds (ex. zones de réception, convoyeurs, silos, systèmes de dépoussiérage) [37]. Pour chaque nœud, on étudie les déviations possibles par rapport aux conditions normales de fonctionnement (ex. "plus de poussière", "moins de ventilation", "pas de convoyage"). Ces déviations sont générées à l'aide de mots-clés/directives spécifiques (plus, moins, absence, inverse, etc.) appliqués aux paramètres du système (débit, pression, température, concentration). L'ensemble est consigné dans un rapport avec un tableau HAZOP détaillant chaque déviation, ses causes, effets et recommandations. L'application de la méthode HAZOP au stockage de céréales et légumes secs consiste à décomposer le process en nœuds comme illustré par le tableau ci-dessous. Les principaux paramètres étudiés pour chaque nœud sont :

- la quantité et concentration de poussières dans l'air.
- la vitesse et débit des convoyeurs/élévateurs.
- la température et humidité dans les silos.
- le fonctionnement des filtres et systèmes de captage.
- L'isolation/étanchéité des zones (éviter dispersion poussière).
- la présence et fonctionnement des dispositifs de sécurité (alarme, extinction).

« Plus » dans concentration poussière : indique une augmentation excessive de poussière dans l'air, souvent due à un dépoussiérage insuffisant ou à un phénomène ponctuel (rupture, surcharge).

« Moins » dans débit produit : Lorsque le transport de grains est ralenti ou stoppé, cela entraîne un déséquilibre dans la chaîne, pouvant provoquer des accumulations de poussière et des surcharges ailleurs.

« Absence » dans fonctionnement filtre : cette déviation critique déclenche des risques majeurs car le filtre stoppe la diffusion directe de poussières fines inflammables.

« Inverse » ou non-respect des procédures : Mauvaise gestion des déchets ou nettoyage, conduisant à une dispersion incontrôlée de poussière.

Nœud du process	Paramètre	Déviation	Causes possibles	Effets / Conséquences potentielles	Risques majeurs associés	Mesures correctives
Système de dépoussiérage	Fonctionnement filtre	Absence	- Panne moteur ventilateur, obstruction filtre, rupture manche	- Diffusion de poussières, pollution atmosphérique	Risque d'incendie ou explosion, pollution accrue	- Redondance système, maintenance rigoureuse, dispositif alarme panne filtre
Convoyeur et élévateur	Débit produit	Plus	- Suralimentation, capteur défaillant ou commande erronée	- Surcharge mécanique, augmentation des émissions de poussières	Usure prématurée, risques mécaniques et poussières	- Automatisation et régulation fine du débit - Diagnostics réguliers
		Moins	- Arrêt moteur, panne	- Arrêt partiel ou complet, stocks bloqués	Arrêt de production, risque formation de poussières stagnantes	- Maintenance préventive, contrôle moteur
Silo de stockage	Température	Plus	- Fermentation, humidité élevée, dysfonctionnement système ventilation	- Auto-échauffement, incendies éventuels	Incendie, dégradation produit, risque d'explosion	- Surveillance continue température et humidité - Ventilation ciblée et efficace - Alarmes préventives
		Moins	- Ventilation excessive ou panne du système	- Température trop basse, mauvaise conservation produit	Risque de condensation, moisissures	- Ajustements ventilation, maintenance régulière
Gestion des déchets de poussières	Stockage déchets	Inverse (non stocké)	- Mauvaise procédure, absence de zone dédiée	- Remise en suspension des poussières, contamination des zones adjacentes	Explosion secondaire, risque sanitaire	- Stockage hermétique, procédures strictes d'élimination, formation personnel
Procédures de nettoyage	Méthode nettoyage	Inappropriée	- Utilisation d'air comprimé ou balais qui soulèvent poussières	- Dispersion de poussières dans l'environnement	Exposition accrue du personnel, risque d'incendie/ explosion	- Formation du personnel, usage exclusif de systèmes aspirants sécurisés

Tableau 9:HAZOP pour le stockage des céréales

IV.4 Mesures mises en place par le CCLS pour le contrôle des poussières

Le dépoussiérage, dans le contexte de la Coopérative des Céréales et des Légumes Secs (CCLS) d'Oran, désigne l'action d'éliminer la poussière et les particules fines présentes sur les équipements, les installations et les produits agricoles. Cette opération est essentielle pour maintenir un environnement de travail propre, assurer la qualité des produits et prévenir les risques liés à l'accumulation de poussière, tels que les incendies ou les problèmes de santé [38].

Dans le cadre de la prévention des risques liés à la poussière, le dépoussiérage au sein de la Coopérative des Céréales et Légumes Secs (CCLS) est principalement assuré par des filtres à manches associés à des systèmes d'aspiration équipés de hottes. Ces dispositifs sont soumis à des opérations régulières de maintenance préventive, notamment le remplacement périodique des manches filtrantes, afin d'éviter l'accumulation excessive de poussières susceptible de compromettre leur efficacité. Par ailleurs, pour assurer la qualité du stockage et prévenir les risques d'infestations, de développement de moisissures ainsi que les risques sanitaires et mécaniques afférents, des opérations de nettoyage et d'entretien des silos et des équipements sont réalisées, bien que celles-ci demeurent occasionnelles. On soulignera également l'intérêt particulier que le service HSE porte à la formation des opérateurs quant aux risques liés à la poussière. Il convient toutefois de souligner certaines carences, notamment l'absence d'équipements certifiés ATEX ainsi que l'absence de zonage ATEX dans le cadre du stockage des grains. Ces lacunes représentent un enjeu majeur en matière de sécurité, exposant les installations à des risques importants d'explosion aux conséquences potentiellement graves, tant sur le plan humain que matériel. Dès lors, il apparaît indispensable d'intégrer ces dispositifs afin d'assurer la conformité réglementaire et de garantir la sécurité des infrastructures concernées. Le permis de feu est obligatoire pour tous les travaux par points chauds, c'est-à-dire les opérations générant des étincelles, des flammes ou de la chaleur pouvant provoquer un incendie, comme le soudage, le meulage ou le découpage. Les locaux de stockage de céréales contiennent des matières combustibles (poussières de céréales, grains.) qui augmentent fortement le risque d'incendie ou d'explosion. Ce permis doit être accompagné d'un plan de prévention rigoureux, intégrant l'évaluation des risques, les mesures de prévention (nettoyage préalable, protection des matières combustibles, mise à disposition d'extincteurs adaptés), la surveillance pendant et après les travaux, et les procédures d'alerte et d'évacuation en cas d'incident.

IV.5 Recommandations

IV.5.1 Respect des exigences réglementaires ATEX

Les poussières accumulées dans les silos, sur les sols, parois, équipements et conduits augmentent sensiblement le risque d'explosion et d'incendie. Il est donc crucial :

- de respecter les prescriptions réglementaires ATEX pour prévenir les risques d'explosion dans les environnements industriels. Le zonage ATEX classe les espaces en fonction de la fréquence et de la durée de la présence d'atmosphères explosives. Les zones 20, 21 et 22 correspondent spécifiquement aux risques liés aux poussières combustibles. Cette classification précise permet d'orienter les mesures de sécurité adaptées afin de limiter la survenue d'explosions, notamment par des procédures de gestion et des normes techniques rigoureuses [39]

- de mettre en œuvre des équipements certifiés ATEX. Cette certification garantit que les équipements utilisés dans les zones à risque sont conçus pour prévenir toute source d'inflammation qui pourrait déclencher une explosion. Les équipements certifiés, tels que moteurs, filtres et ventilateurs, ont été testés selon des standards stricts pour offrir différents niveaux de protection adaptés aux zones définies (catégories 1 pour les zones les plus à risque, puis catégories 2 et 3 pour les zones moins exposées). Par exemple, les équipements classés dans la catégorie 1 assurent une protection très élevée même en cas de défaillance simultanée. La certification implique également que ces équipements résistent aux contraintes spécifiques des environnements explosifs, en limitant les étincelles, la chaleur, ou toute autre source d'inflammation [39].

- de surveiller en continu les émissions de poussières et la concentration de particules dans l'air pour détecter et gérer les atmosphères explosibles avant qu'elles n'atteignent un seuil dangereux. Des systèmes de mesure certifiés ATEX permettent d'obtenir une analyse précise et en temps réel des niveaux de poussières, offrant la possibilité d'alerter immédiatement sur une augmentation des risques [39].

IV.5.2 Nettoyage et entretien sécurisé des silos

Le nettoyage régulier des silos est essentiel pour éviter l'accumulation de poussières, avec une limite recommandée de dépôts inférieurs à 3 mm, cette opération est particulièrement cruciale pour les silos de stockage des céréales, afin de garantir la qualité du stockage, prévenir les infestations, les moisissures, et éviter les risques sanitaires et mécaniques. Un silo mal entretenu accumule poussières, résidus de grains, micro-organismes, insectes et rongeurs, compromettant la qualité des grains stockés et entraînant des pertes économiques significatives. De surcroit, la poussière fine et les micro-organismes présents peuvent représenter un danger pour la santé des travailleurs, provoquant irritations et allergies [37]. Le nettoyage régulier contribue également à limiter la corrosion des parois et l'encrassement des équipements, ce qui prolonge la durée de vie du silo. Il est donc recommandé :

- d'effectuer un nettoyage au minimum deux fois par an, idéalement au printemps et à l'automne, pour préparer le stockage avant et après la récolte. De plus, après chaque vidange complète du silo, un nettoyage physique est conseillé avant tout nouveau chargement afin de réduire la contamination et la formation de moisissures.

- d'utiliser des équipements antidéflagrants et de mettre en œuvre de procédures de sécurité strictes pendant le nettoyage des silos pour réduire les risques d'explosion, notamment en présence de poussières combustibles comme celles des céréales, et pour protéger la santé et la vie des intervenants. Les équipements antidéflagrants incluent des outils manuels spécifiques tels que marteaux, brosses, grattoirs et pelles fabriqués à partir de matériaux non générateurs d'étincelles, comme l'acier inoxydable ou certains plastiques.

- d'utiliser des lampes basse tension certifiées ATEX (typiquement 24 V) pour l'éclairage dans les silos afin d'intervenir en toute sécurité dans les atmosphères potentiellement explosives [39].

- d'utiliser des détecteurs de gaz à quatre composantes (O2, CO, H2S, gaz inflammables) avant et pendant les interventions pour garantir un environnement sûr.

- d'utiliser des équipements de protection individuelle adaptés par les intervenants, notamment des masques ventilés, des combinaisons antistatiques, des gants, et des harnais antichute pour les travaux en hauteur ou en milieu confiné.

- de se conformer aux exigences du permis feu, qui régit les procédures de sécurité à respecter avant toute opération de nettoyage dans un silo. Ce document formalise la mise en œuvre de mesures spécifiques visant à éliminer toute source potentielle d'ignition, notamment les flammes nues, les étincelles ainsi que l'utilisation d'outils non conformes, afin de prévenir les risques d'incendie et d'explosion dans ces environnements à risque.

- de couper toute alimentation électrique susceptible de provoquer des étincelles, telles que les machines, éclairages ou moteurs, garantissant ainsi une protection supplémentaire.

- de baliser et sécuriser la zone d'intervention avec une signalisation claire et un contrôle strict des accès.

- de former et sensibiliser les intervenants aux risques ATEX, aux bonnes pratiques de travail en milieu confiné et au port approprié des équipements de protection.

IV.5.3 Désinfection des silos

La désinfection des silos est une étape indispensable pour éliminer les agents pathogènes, moisissures, bactéries et autres nuisibles présents à l'intérieur. Elle intervient après un nettoyage en profondeur et consiste en l'application de produits désinfectants ou de traitements phytosanitaires adaptés, souvent sous forme de pulvérisation ou de nébulisation fine. Cette étape est cruciale pour prévenir la contamination des stocks et garantir la sécurité sanitaire des grains ou aliments entreposés. Il est important de respecter strictement les mesures de sécurité pour protéger les opérateurs et l'environnement. La désinfection doit idéalement être réalisée avant le remplissage du silo, qui doit être parfaitement sec avant toute nouvelle mise en stockage. Par ailleurs, des traitements complémentaires peuvent être employés pour lutter contre les insectes et autres nuisibles [37]. Ces traitements garantissent une désinfection efficace tout en respectant les exigences sanitaires et environnementales liées au stockage agroalimentaire, parmi les types de désinfection couramment utilisés, on trouve :

- La pulvérisation de produits antimicrobiens spécialisés. Ces produits sont conçus pour tuer ou inhiber moisissures et micro-organismes sur les surfaces internes du silo, comme les parois et conduits. Ils sont appliqués par pulvérisateurs manuels ou automatiques.

- La nébulisation est une technique qui diffuse de très fines gouttelettes pour assurer une couverture homogène et une bonne pénétration dans tous les recoins du silo. Le traitement chimique utilise des biocides homologués, disponibles sous forme liquide ou poudre minérale, conformes aux normes sanitaires et agroalimentaires.

- La désinfection à l'ozone est une méthode écologique sans résidus. Elle utilise le gaz ozone pour son fort pouvoir oxydant et antimicrobien, éliminant à la fois micro-organismes, insectes et parasites. .

Chapitre V

Défis et perspectives

V.1 Défis actuels

Les systèmes de dépoussiérage dédiés aux céréales rencontrent de nombreux défis complexes, notamment en raison des risques liés à la combustibilité des poussières ainsi que des exigences réglementaires rigoureuses. Parmi les principaux enjeux figure la gestion efficace du captage des poussières, indispensable à la fois pour assurer la sécurité des installations et protéger la santé des opérateurs. Dans ce contexte, l'emploi de la technique de dépoussiérage par brouillard sec apparaît comme une solution prometteuse.

V.2 Dépoussiérage par brouillard sec

Le dépoussiérage par brouillard sec constitue une méthode avancée et respectueuse de l'environnement pour contrôler les poussières fines, particulièrement adaptée aux secteurs de la manutention et du stockage des céréales. Cette technique repose sur la génération d'un brouillard composé de très fines gouttelettes d'eau, généralement comprises entre 10 et 50 microns de diamètre. Ces gouttelettes sont suffisamment petites pour rester en suspension dans l'air sans humidifier les surfaces environnantes. Le brouillard sec est pulvérisé à proximité immédiate des zones où la poussière est émise, telles que les convoyeurs, points de chute de grains, silos et zones de réception. Ce positionnement stratégique permet une capture immédiate des particules fines en suspension. Les gouttelettes d'eau agglomèrent les particules de poussière, augmentant leur poids et accélérant ainsi leur chute hors de l'air, un phénomène désigné sous le terme de « coalescence humide ». Ce mécanisme limite la dispersion atmosphérique des poussières, réduisant par conséquent la pollution locale et les risques d'inhalation pour les opérateurs.

Un avantage majeur du brouillard sec réside dans le faible volume d'eau utilisé et le contrôle précis de la taille des gouttelettes, qui garantissent un environnement sec et empêchent l'humidification des surfaces, évitant ainsi des problèmes tels que le colmatage des filtres, la corrosion des équipements et la dégradation des grains. Les bénéfices clés de cette méthode incluent une réduction significative des poussières fines dans l'air ambiant, ce qui améliore la qualité de l'air et la santé au travail. La consommation d'eau est également faible comparée aux méthodes traditionnelles de jets d'eau, ce système ne provoque pas d'humidification des surfaces ou des produits stockés, préservant leur qualité et évitant les interruptions dues à l'humidité. Par ailleurs, il réduit le risque d'explosion lié à la poussière combustible en diminuant la concentration de poussières en suspension et la maintenance des équipements est aussi facilitée grâce à une moindre accumulation d'humidité et de

poussière. En outre, cette technologie s'intègre facilement dans les installations existantes, grâce à sa modularité et à sa capacité d'installation ciblée [15].

Un exemple reconnu de cette technologie est celui de la société Mist-Air (voir figure 19), qui propose une solution de dépoussiérage par brouillard sec largement utilisée, notamment dans les carrières et l'industrie agroalimentaire. Cette méthode a prouvé son efficacité pour diminuer les poussières fines tout en évitant l'humidification des surfaces, se positionnant comme une solution durable et performante dans le contrôle des poussières industrielles.



Figure 19: Dépoussiérage par brouillard sec (Mist Air)

V.3 Système de dépoussiérage intelligent basé sur l'IoT

La gestion des poussières dans les industries de transformation et de stockage des céréales constitue un enjeu majeur en matière de santé, de sécurité et d'environnement. Les poussières de céréales et de grains sont non seulement nocives pour la santé des travailleurs, mais également explosives lorsqu'elles atteignent certaines concentrations dans l'air. Pour faire face à ces risques, l'intégration de technologies intelligentes basées sur l'Internet des Objets (IoT) permet aujourd'hui de mettre en place des systèmes de dépoussiérage autonomes, capables de surveiller en temps réel la concentration de poussières et d'agir automatiquement pour prévenir tout incident [40].

Le système se compose de capteurs intelligents, du dépoussiéreur connecté, de la transmission réseau et de la plateforme de traitement.

Les capteurs constituent la première ligne de défense dans la détection et la maîtrise des poussières. Plusieurs types de capteurs sont utilisés :

- Capteurs de particules qui mesurent la concentration de poussières dans l'air au niveau des silos, convoyeurs et zones de travail.
- Capteurs de température et d'humidité qui préviennent les conditions favorisant la fermentation et l'auto-inflammation des grains.
- Capteurs de vibration et pression différentielle qui surveillent l'état du dépoussiéreur et détectent les anomalies telles que le colmatage des filtres.

Le dépoussiéreur, équipé de filtres à manches ou d'un système cyclonique, est relié à des modules IoT permettant :

- le pilotage automatique du ventilateur en fonction du niveau de poussière,
- la régulation des vannes pour concentrer l'aspiration sur les zones critiques,
- le nettoyage automatique des filtres basé sur les mesures de colmatage [40].

Les données issues des capteurs sont transmises via des protocoles de communication sans fil vers une passerelle IoT qui centralise les informations et les envoie vers une plateforme de traitement et d'analyse dont le rôle est d'effectuer [41] :

- le traitement en temps réel pour détecter tout dépassement de seuil.
- la maintenance prédictive grâce à des algorithmes capables d'anticiper l'usure des filtres ou des moteurs .
- la visualisation des données via un tableau de bord interactif.
- l'archivage automatique des historiques afin d'assurer la traçabilité et de répondre aux exigences réglementaires.

Lorsque la concentration de poussières atteint un seuil critique :

- une alerte visuelle et sonore est générée localement (sirène, panneau lumineux),
- une notification est envoyée au responsable HSE par SMS ou application mobile,
- le dépoussiéreur passe automatiquement en mode intensif pour réduire le risque.

Les avantages d'un tel système sont nombreux à savoir :

- la prévention des explosions grâce à une surveillance proactive.
- l'amélioration de la santé au travail en limitant l'exposition des opérateurs aux poussières.
- l'optimisation énergétique par une régulation intelligente du dépoussiéreur.
- la réduction des coûts de maintenance via la maintenance prédictive.
- la conformité réglementaire avec la traçabilité des mesures et des interventions.

Une représentation schématique du système (figure 20) montre les interactions entre les capteurs, le dépoussiéreur connecté, la passerelle IoT, la plateforme de traitement.

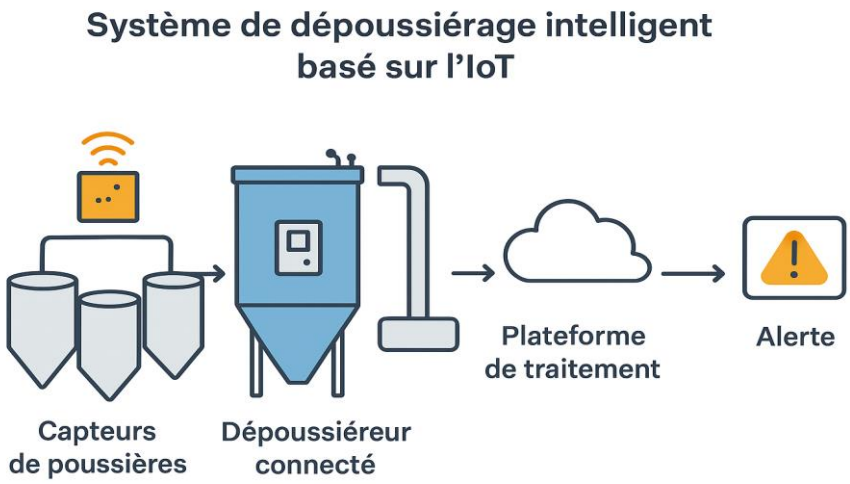


Figure 20 : système de dépoussiérage intelligent basé sur l'IoT

Conclusion

Au terme de cette étude, il apparaît clairement que la gestion des poussières industrielles représente un défi important pour l'entreprise CCLS, notamment en raison des spécificités liées au stockage des céréales et légumes secs. La complexité des sources de poussières et des risques associés nécessite la mise en place de solutions techniques adaptées, conjuguées à une organisation rigoureuse du travail et à une sensibilisation continue du personnel.

Les systèmes de filtration tels que les filtres cycloniques, à manches ou à cartouches, ainsi que les dispositifs d'aspiration efficaces, démontrent leur pertinence dans la maîtrise des émissions particulaires. Par ailleurs, la maintenance préventive, la formation des travailleurs, et le respect des normes en vigueur sont des leviers essentiels pour limiter l'exposition aux poussières et réduire les risques sanitaires et sécuritaires.

L'étude de cas réalisée au sein de l'entreprise CCLS a permis de mettre en évidence les points critiques ainsi que les axes d'amélioration, notamment par le biais de la sensibilisation du personnel au respect des exigences réglementaires relatives à la directive ATEX tout au long du processus de stockage des grains, en particulier lors des opérations de nettoyage et de désinfection des silos.

En outre, l'intégration de technologies innovantes telles que le dépoussiérage par brouillard sec ou les systèmes IoT de surveillance en temps réel ouvre des perspectives prometteuses pour renforcer la sécurité et l'efficacité des installations à l'avenir. L'intégration de l'IoT dans les systèmes de dépoussiérage industriel constitue un pas important vers une industrie où les procédés sont non seulement automatisés mais également intelligents et prédictifs.

Références bibliographiques

[1] Office Algérien Interprofessionnel des Céréales (OAIC). Fiche technique – CCLS Oran (FT CCLS ORAN) 2025.

[2] Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture (FAO). Synthèse de l'expérience africaine sur les pertes après récolte : stockage des grains et silos-fosses 2015.

[3] U.S. Environmental Protection Agency (EPA). A Guide to Air Quality Permit Approval for New and Modified Minor Sources: Particulate Matter 2016.

[4] Stivent Industrie. Apprendre à définir les types de particules de poussière pour mieux s'en protéger 2023.

[5] INRS (Institut national de recherche et de sécurité). Poussières : prévenir les risques liés aux poussières 2020.

[6] INRS (Institut national de recherche et de sécurité). Poussières alvéolaires (lieux extérieurs des mines et carrières) — Valeurs limites d'exposition professionnelle (VLEP) 2013.

[7] CNRS – CNPS (Coordination Nationale de Prévention et Sécurité. Guide Risques Chimiques. CNRS; 2022.

[8] World Health Organization (WHO). Ambient (Outdoor) Air Pollution and Health. World Health Organization; 2019.

[9] Organisation mondiale de la Santé (OMS). La silicose. La silicose; 2020.

[10] République Algérienne Démocratique et Populaire. Décret exécutif n° 93-165 du 10 juillet 1993 portant réglementation des émissions atmosphériques de fumées, gaz, poussières, odeurs et particules solides des installations fixes. Décret exécutif (Journal officiel, PDF); 1993.

[11] République Algérienne Démocratique et Populaire. Décret exécutif n° 91-05 du 19 janvier 1991 relatif aux prescriptions générales de protection applicables en matière d'hygiène et de sécurité en milieu de travail. Décret Exéc J Off PDF 1991.

[12] INRA (Institut National de la Recherche Agronomique. Les poussières agricoles et leurs risques sanitaires. INRA Editions; 2019.

[13] Meynard, Jean-Marc. Les poussières dans les procédés agricoles : récolte, transformation et stockage des céréales et légumes secs. Éditions Quae; 2018.

[14] Doudou, Abdellah and Damine, Samy. Maîtrise des risques d'explosion de poussière et amélioration de la performance d'un procédé industriel : Cas : GlaxoSmithKline (GSK) 2017.

[15] Guillet, Pierre. Le dépoussiérage industriel : Techniques et équipements}. Éditions Techniques de l'Ingénieur; 2017.

[16] Wilson, John. La filtration de l'air dans les environnements industriels. 2018.

[17] Fauvet, Pierre. Le contrôle des poussières et la prévention des explosions dans l'industrie. Revue de la Sécurité Industrielle 2016;15.

[18] Russel, William J. Filtration et séparation des particules : Les filtres cycloniques dans les processus industriels. Elsevier; 2019.

[19] Stewart, Kenneth. Séparateurs cycloniques et systèmes de filtration dans les industries modernes. Springer; 2017.

[20] Montgomery, Richard L. Filtration industrielle : Les filtres à manches et leur fonctionnement. Elsevier; 2016.

[21] Singh, Arvind. Filtration industrielle : Les filtres à cartouches et leur fonctionnement. Elsevier; 2020.

[22] Gupta, Shyam. Systèmes de filtration et cartouches de filtration : Typologie et fonctionnement. Springer; 2019.

[23] Miller, Thomas. Maintenance préventive dans les systèmes industriels : Gestion des risques et sécurité. Wiley; 2020.

[24] Smith, John. Entretien des installations pour limiter les risques de dispersion de poussière dans les environnements industriels 2019;23.

[25] Rodriguez, Carlos. Maintenance des installations électriques en zones ATEX : Normes et pratiques sécuritaires. 2018.

[26] Lewis, Alexander. Maintenance et entretien des systèmes de dépoussiérage dans l'industrie : Méthodes et pratiques 2021;12.

[27] Blanc, Philippe. Formation des travailleurs aux risques industriels : Prévention des risques liés aux poussières et sécurité en milieu de travail. Éditions Techniques Industrielles; 2021.

[28] Harris, Benjamin. Aménagement des postes de travail pour la réduction de l'exposition aux poussières : Bonnes pratiques et technologies. Journal of Occupational Safety and Ergonomics} 2020;18.

[29] Johnson, Rachel. Équipements de protection individuelle (EPI) : Rôle dans la prévention des risques industriels liés aux poussières. Journal of Industrial Hygiene and Safety 2020;35.

[30] Rodriguez, Laura. Signalisation de sécurité en milieu de travail : Normes et pratiques pour la gestion des risques industriels et ATEX. 2018.

[31] Michaud, Pierre. Gestion des risques d’explosion dans les environnements industriels : Les atmosphères explosives et les normes ATEX. Éditions du Travail. 2019.

[32] Smith, John A. Gestion des poussières dans le stockage des grains : Sources, risques et solutions. 2019.

[33] Hansen, Olaf. Risques d’explosion et d’incendie dus aux poussières combustibles dans l’industrie alimentaire 2020;45.

[34] Rogers, Susan. Risques sanitaires associés à l’exposition aux poussières fines dans l’agriculture et l’industrie. Environmental Health Perspectives 2020;28.

[35] Jones, Mark. Gestion des accumulations de poussière et risques d’explosion secondaire dans les silos industriels. Journal of Hazardous Materials 2021;150.

[36] Taylor, James. Analyse des risques dans l’industrie : Méthodes AMDEC et HAZOP pour la gestion des risques industriels. Wiley-Blackwell; 2018.

[37] ISO. ISO 6306:2019 - Normes de sécurité pour les silos et la manutention des grains. 2019.

[38] Peterson, Robert L. Contrôle des poussières dans les installations industrielles : Systèmes de dépoussiérage et de filtration. Techniques Industrielles; 2020.

[39] Jean, Frédéric. Réglementation ATEX : Prévention des risques d’explosion dans les installations industrielles. 2021.

[40] Muller, Julien. Systèmes de dépoussiérage intelligents basés sur l’IoT pour la gestion des poussières dans les environnements industriels. Ind Air Qual Saf 2021;19.

[41] Garnier, Thomas. Technologies IoT pour la gestion des poussières et la prévention des risques d’explosion dans les industries. 2020.