

La mesure des taux d'émission de poussière le long du circuit de broyage et de livraison du ciment de la société "Les Ciments de Bizerte"

Melainine Aillal ^{(1)*}, Houssin Tiss ⁽²⁾, Hamouda Beyrem ⁽³⁾, Mohamed Yahya Lafdal ⁽¹⁾

1. *University of Nouakchott, Faculty of Science and Technology, New University Campus, 5026, Nouakchott, Mauritania*

2. *Quality Responsible at GCM Industries Ouagadougou, Burkina faso*

3. *Laboratory of Environment Biomonitoring, Coastal Ecology Unit, Faculty of Sciences of Bizerte, University of Carthage, Zarzouna, Tunisia*

* *Corresponding author: Melainine Aillal, University of Nouakchott, Faculty of Science and Technology, New University Campus, 5026, Nouakchott, Mauritania*

Infos	Abstract - Résumé
Received: 29 December 2024 Accepted: 08 August 2025	The company "Les Ciments de Bizerte" is facing a dust pollution problem that affects both the environment and employee health. This article focuses on measuring dust emission levels in the grinding and packaging workshops, with the aim of improving the management and rehabilitation of these facilities. The results highlight critical zones where emissions reach particularly high levels, notably near the packer (4,270,019 mg/m ² /day) and at the drop points of the cement transport systems (1,585,403 mg/m ² /day). The objective is to identify the sources of emissions and assess their impact in order to address them effectively and improve environmental conditions. The protocol for collecting and measuring emissions is based on a series of measurements that take into account both operational and climatic conditions to analyze variations in emission rates. Among the proposed solutions are immediate actions, such as replacing defective filters and cleaning floors, as well as longer-term actions, such as replacing aging equipment with more ecological and economically viable alternatives.
Keywords - Mots clés Cement, dust emissions, pollution, grinding and delivery, rehabilitation	
Ciments, émissions de poussière, pollution, broyage et livraison, réhabilitation	
Corresponding authors emails: melainineaillal@gmail.com melainineaillal@una.mr lafdal@environnement.gov.mr tiss.houssine@gcm-industries.com hamouda.beyrem@fsb.ucar.tn	L'entreprise "Les Ciments de Bizerte" fait face à un problème de pollution par la poussière, affectant à la fois l'environnement et la santé des employés. Cet article se concentre sur la mesure des niveaux d'émission de poussière dans les ateliers de broyage et d'ensachage, dans le but d'améliorer la gestion de la réhabilitation de ces ateliers. Les résultats mettent en évidence des zones critiques où les émissions atteignent des niveaux particulièrement élevés, notamment à proximité de l'ensacheuse (4 270 019 mg/m ² /j) et aux points de chute des systèmes de transport du ciment (1 585 403 mg/m ² /j). L'objectif est d'identifier les causes des émissions et d'évaluer leur impact afin de les traiter efficacement et d'améliorer les conditions environnementales. Le protocole de collecte et de mesure des émissions repose sur des séries de mesures prenant en compte les conditions opérationnelles et climatiques pour analyser les variations des taux d'émission. Parmi les solutions proposées, on trouve des actions immédiates comme le remplacement des filtres défectueux et le nettoyage des sols, ainsi que des actions à plus long terme, telles que le remplacement des équipements vieillissants par des alternatives plus écologiques et économiquement viables.

1. INTRODUCTION

L'environnement, bien que considéré comme une ressource inépuisable, est en réalité une entité fragile, constamment soumise aux pressions des activités humaines [1]. L'industrialisation, en particulier, est une source majeure de pollution et d'épuisement des ressources naturelles, entraînant une dégradation

significative des écosystèmes. Les impacts de ces activités se manifestent sous diverses formes, notamment par l'émission de poussières, qui sont l'une des principales sources de pollution dans de nombreux secteurs industriels, tels que celui de la production de ciment [2]. Ces émissions peuvent avoir des conséquences graves sur la qualité de l'air, la santé des travailleurs et la biodiversité locale [3]. Face à ces enjeux environnementaux majeurs, la société civile prend de plus en plus conscience de la nécessité de réguler ces activités afin de protéger notre environnement pour les générations futures [4].

Cette prise de conscience collective se traduit par la mise en place de normes et de certifications qui obligent les entreprises à intégrer des pratiques respectueuses de l'environnement dans leur gestion quotidienne. La société "Les Ciments de Bizerte" illustre bien cette tendance en étant certifiée ISO 9001 version 2015 pour son système de gestion de la qualité, ISO 14001 version 2004 pour son système de management environnemental, et en se préparant à obtenir la certification OHSAS 18001 pour la gestion de la sécurité et de la santé au travail. Ces certifications sont des indicateurs clés que l'entreprise s'engage dans une démarche responsable visant à minimiser son impact environnemental et à améliorer la sécurité de ses employés [5].

Dans le cadre de cette démarche, la mesure des émissions de poussières dans les ateliers de broyage et d'ensachage constitue un aspect fondamental pour évaluer l'ampleur des impacts environnementaux et pour guider les actions correctives. En effet, selon la norme NF-X43-007, qui est couramment utilisée pour quantifier les retombées de poussières industrielles, la mesure du taux d'émission est effectuée en collectant la poussière déposée sur une surface déterminée sur une période bien définie. Cela permet de calculer la quantité de poussières récupérées, exprimée en $\text{mg}/\text{m}^2/\text{j}$ [6]. Cette norme aide à standardiser la collecte des données et à assurer la comparabilité des résultats entre différentes installations et périodes d'observation.

Les caractéristiques des poussières jouent également un rôle crucial dans l'évaluation de leur impact. L'identification et la classification des poussières en fonction de leur taille, composition et origine permettent de mieux comprendre les risques qu'elles posent, tant pour la santé des travailleurs que pour l'environnement. Par exemple, les poussières fines ($\text{PM}_{2.5}$) sont particulièrement dangereuses, car elles peuvent pénétrer profondément dans les poumons et affecter les voies respiratoires, entraînant des maladies respiratoires graves [7]. Ainsi, une caractérisation détaillée des poussières permet non seulement de quantifier leur émission, mais aussi d'évaluer leur potentiel de nuisance et de proposer des solutions de gestion adaptées [6].

L'objectif de ce travail est donc de mesurer et de suivre les taux d'émission de poussières dans les ateliers de broyage et d'ensachage de l'usine "Les Ciments de Bizerte", en tenant compte des variations liées aux conditions opérationnelles et climatiques. Ces mesures permettront d'évaluer l'impact de ces émissions sur l'environnement et la santé des employés, et de proposer des actions visant à réduire leur niveau. À long terme, ces efforts contribueront à une gestion plus durable de l'entreprise, en harmonie avec les objectifs environnementaux et sociaux définis par les normes ISO et OHSAS.

2. MATÉRIEL ET MÉTHODES

2.1. Matériel nécessaire

2.1.1. Base de la méthode de mesure

La mesure des retombées de poussières dans les ateliers industriels est réalisée à l'aide de la norme NF-X43-007, qui fournit une méthode normalisée pour évaluer quantitativement les émissions de poussières. Cette norme permet de déterminer l'importance des retombées de poussières en fonction de leur poids récupéré après exposition d'une surface spécifique pendant une période déterminée. La surface d'exposition doit être suffisamment grande pour capturer toutes les poussières en suspension, et la poussière recueillie ne doit être retirée du bac qu'après un pesage précis. Cette méthode est essentielle pour quantifier les émissions de poussières et évaluer leur impact sur l'environnement et la santé des travailleurs [6].

Les mesures des émissions de poussières dans un environnement industriel doivent être effectuées de manière répétée afin d'obtenir des résultats représentatifs. Ces mesures doivent être réalisées dans des conditions similaires, en tenant compte de l'état de l'atelier (en fonctionnement ou à l'arrêt) et des conditions climatiques variables, telles que la température, l'humidité et la vitesse du vent. L'emplacement des bacs de collecte, essentiel pour assurer la représentativité des mesures, doit également être pris en compte [8].

Les émissions de poussières sont ensuite classées selon leur degré de pollution, permettant de définir les zones en fonction de l'intensité de l'exposition. Ce système de classification permet de mieux comprendre les risques associés à chaque niveau de pollution et d'adapter les stratégies de gestion de l'air. Voici les catégories utilisées :

- **Très faible** : $< 150 \text{ mg}/\text{m}^2/\text{jour}$ (zone faiblement polluée)
- **Faible** : de 150 à $350 \text{ mg}/\text{m}^2/\text{jour}$ (zone moyennement polluée)
- **Important** : de 350 à $500 \text{ mg}/\text{m}^2/\text{jour}$ (zone polluée)

- **Fort** : de 500 à 1 000 mg/m²/jour (zone très polluée)
- **Très fort** : > 1 000 mg/m²/jour (zone très fortement polluée) [9-10].

Une fois les mesures effectuées, un simple calcul permet de comparer la quantité de poussières collectée à la norme de pollution élevée (> 1000 mg/m²/jour), correspondant à une zone très fortement polluée. Cela permet d'évaluer le respect des normes environnementales et de prendre les mesures correctives nécessaires. Cette analyse des poussières s'appuie sur un processus de traitement rigoureux, comprenant des étapes de séchage et de confection de pastilles, avant d'être analysée par spectrométrie des rayons X dans le laboratoire de l'usine [11,12].

2.1.2. Confection des bacs d'échantillonnage

Les bacs utilisés pour la collecte des poussières ont été fabriqués dans la menuiserie de l'atelier de l'usine, puis soigneusement peints. La peinture appliquée a pour objectif principal d'empêcher l'enfouissement des particules de poussières dans les fissures du matériau, garantissant ainsi une collecte plus fiable et précise des poussières déposées pendant les mesures. Cette étape est essentielle pour assurer que la surface de collecte reste uniforme et que les résultats de mesure ne soient pas faussés par des particules piégées dans les imperfections du bac [13].

Chaque bac a été identifié par un numéro spécifique pour permettre une traçabilité et une gestion rigoureuse des différents échantillons collectés durant l'expérience. Cette identification est cruciale pour associer correctement les résultats des mesures à chaque bac et ainsi éviter toute confusion ou erreur dans les analyses.

Avant de commencer l'expérience, les bacs ont été incubés dans une étuve à une température contrôlée de 26 °C pendant 24 heures afin d'assurer un séchage complet et d'obtenir leur poids sec. Cette étape de séchage permet d'éliminer toute humidité résiduelle qui pourrait influencer la précision des mesures de poids des poussières collectées. En effet, l'humidité présente dans les échantillons pourrait augmenter artificiellement le poids mesuré, rendant les résultats inexacts.

Ces mesures de poids initiales des bacs, réalisées avant le démarrage de l'expérience, ont pour but de caractériser précisément les bacs d'échantillonnage et d'assurer la standardisation des mesures sur l'ensemble des échantillons collectés. Elles fournissent également une base de comparaison permettant d'évaluer avec précision les quantités de poussières récupérées sur chaque bac pendant l'expérimentation [13].

2.1.3. Lieux des prélèvements

Le choix des lieux pour mesurer le taux d'émission des poussières dans les ateliers de broyage et d'ensachage de l'usine a été déterminé après une visite conjointe avec nos encadreurs. L'objectif de cette étude est d'analyser les principales zones des ateliers de traitement, en prenant en compte les particularités de chaque site et leurs conditions de fonctionnement. En définitive, six points ont été sélectionnés dans l'atelier d'ensachage et quatre dans l'atelier de broyage pour effectuer les mesures [13,14].

Critères pour l'implantation des bacs :

Lors de l'implantation des bacs, il est crucial de respecter certaines recommandations afin de garantir la qualité et la fiabilité des mesures, ainsi que la sécurité des opérateurs et des travailleurs. Les points suivants ont été pris en compte pour le placement des bacs :

- **Éviter les zones où des accidents de travail peuvent survenir** : Le placement des bacs ne doit pas interférer avec les zones à risque élevé d'accidents, afin de protéger la sécurité des travailleurs et de ne pas perturber les opérations [13,14].
- **Éviter la proximité immédiate des voies de circulation** : Les bacs doivent être placés loin des voies de circulation des camions et des équipements mobiles pour éviter qu'ils ne soient déplacés ou perturbés par ces mouvements.
- **Éviter les zones avec des obstacles gênants** : Les bacs ne doivent pas être placés près d'obstacles (tels que des machines, des conduits ou des tuyaux) qui pourraient altérer le chemin des poussières et modifier les résultats de l'échantillonnage [13,14].
- **Choisir des emplacements dégagés** : Il est essentiel de choisir un emplacement dégagé, à une distance suffisante des obstacles environnants, pour garantir que les poussières collectées proviennent directement des émissions des sources étudiées et non d'autres sources extérieures [13].

2.1.4. Protocole de travail :

La durée d'exposition des bacs peut varier entre un jour et un mois, en fonction de la fréquence et du niveau des retombées de poussières. Il est important d'adapter cette durée aux besoins de l'étude et à la variabilité des taux d'émission observés. De plus, les conditions météorologiques doivent être prises en compte pendant toute la période d'exposition. En particulier, la direction et la vitesse des vents, ainsi que les précipitations, peuvent influencer la dispersion des poussières et, par conséquent, les résultats des mesures. Cela est essentiel pour comprendre l'impact des facteurs externes sur la collecte des poussières [15,16]. Les interférences extérieures (insectes, oiseaux, pluie) peuvent biaiser les mesures ; dans ce cas, les données sont rejetées et l'expérience doit être répétée [9-10].

2.1.5. Gestion des Interférences :

Il est également important de considérer la présence d'interférences pouvant fausser les résultats. Ces interférences peuvent inclure des éléments extérieurs comme des moucheron, des déjections d'oiseaux ou des phénomènes de lessivage dus à la pluie. Si ces interférences sont identifiées, les résultats doivent être écartés et l'expérimentation répétée pour garantir la validité des données obtenues [9-10].

Le tableau 1 indique la position des bacs de prélèvements.

Le suivi des émissions de poussière le long du circuit broyage et livraison du ciment au niveau de l'usine a été réalisé pendant deux période différentes. Ainsi que, les mesures ont été effectués par les mêmes bacs dans les deux ateliers à différentes périodes.

2.1.6. Conditions météorologiques pendant la période d'exposition des bacs

Selon la norme NF 43-007, les conditions météorologiques (le vent, la pluviométrie, la neige, le gel ...) peuvent avoir une influence sur le prélèvement des émissions de poussières [17].

Tout le long de deux période, la température a varié entre 16°C et 32°C à Bizerte alors que la précipitation a varié de 0 mm à 3.5 mm. L'intensité du vent a varié de 9.5 Km/h (vent léger) à 52 Km/h (vent intense).

2.1.7. Moyen de pesage et taux d'émission

Chaque bac doit être pesé avant d'être mis en place pour déterminer son poids initial. Les bacs mis en place doivent être pesés et suivis quotidiennement afin de surveiller l'évolution des retombées de poussières et de s'assurer qu'ils restent correctement positionnés, malgré la dynamique des ateliers.

Chaque bac exposé sera pesé avec la matière collectée, la différence de poids servira à déterminer la quantité de poussière collectée, en tenant compte de la surface du bac et de la durée d'exposition. Le poids permettra de calculer le taux d'émission en mg par m² par jour.

Ainsi, la quantité de poussière collectée est calculée comme suit :

$$\text{Quantité de poussière collectée (mg)} = \text{Poids final de bac} - \text{Poids initial du bac vide}$$

Le taux d'émission est calculé selon la formule suivante :

$$T = \frac{P}{S \times T} \times 60 \times 24 \text{ (mg/m}^2\text{/j)}$$

P : Poids des poussières recueillies (mg)

S : Surface du bac exposée (m²)

T : nombre de jours d'exposition du bac (j)

2.2. Traitement et analyse des échantillons

2.2.1. Détermination de la perte au feu

➤ Principe :

Selon la norme NT 47,02 ; On détermine la perte au feu par calcination de l'échantillon à une température d'environ 950 ± 25°C. A l'issue de cet essai,

- L'eau et le CO₂ disparaissent de l'échantillon.

- Une oxydation partielle des éléments se produit.

Une correction de la perte au feu est nécessaire pour lever toute influence due à l'oxydation.

➤ Méthode :

Une quantité de poussière est pesée dans une tare en platine (P₂) ayant un poids vide (P₁), l'ensemble est calciné dans un four à moufle réglé à 950 °C pendant 1 h. La tare sera par la suite refroidie dans un dessiccateur à la température ambiante et pesé, soit (P₃) son nouveau poids.

➤ Expression du résultat :

$$PF = \frac{(P_2 - P_3)}{(P_2 - P_1)} \times 100$$

Tableau 1: Position des bacs de prélèvements

Les bacs	L'atelier d'ensachage	L'atelier du broyage
1	Début d'élévateur	Sortie du broyeur de ciment
2	Ensacheuse	Entrée du broyeur de ciment
3	Trémie d'ensacheuse	1ère étage au-dessus du broyeur
4	Crible et filtre	Filtre procès
5	Fin d'élévateur	
6	Bouche d'extraction	

- P_1 : poids de la tare vide
 P_2 : poids de la tare et de l'échantillon avant séchage
 P_3 : poids de la tare et de l'échantillon après séchage

2.2.2. Analyse fluorescence aux rayons X :

L'analyse par fluorescence aux rayons X (XRF) est utilisée pour déterminer la composition chimique des matières premières, telles que les calcaires, la marne, le clinker et le ciment, dans le processus de fabrication du ciment. *Les Ciments de Bizerte* utilise un spectromètre à fluorescence X Thermo ARL9900, qui permet un contrôle qualité rapide et précis des mélanges crus [13-14].

Principe :

La méthode repose sur l'excitation des atomes par un faisceau de rayons X, entraînant l'émission de rayonnements caractéristiques. Ces rayonnements sont ensuite analysés pour déterminer les éléments présents. Le système QCX est utilisé pour un contrôle continu de la qualité des matières premières et des mélanges, garantissant des résultats fiables et rapides [13-14].

Procédure :

- Échantillonnage et préparation: L'échantillon est homogénéisé, puis broyé et compacté avec de la cire d'abeille pour former des pastilles.
- Analyse : Les pastilles sont analysées afin d'identifier des éléments tels que CaO, SiO₂ et Fe₂O₃, ces oxydes étant les principaux constituants des différents types de ciments, notamment le ciment Portland. Leur quantification permet d'estimer la nature du ciment à l'origine des retombées, d'évaluer la pureté des poussières collectées et, par conséquent, de déterminer leur potentiel de valorisation. Si la composition des poussières se rapproche de celle du cru ou du ciment fini, leur réintroduction dans le circuit de production peut être envisagée, contribuant ainsi à la réduction des pertes de matière et à une meilleure performance environnementale du processus industriel.

Avantages :

- Rapidité et précision dans les analyses.
- Non-destructivité de l'échantillon.
- Contrôle continu pour garantir la qualité du produit final.

3. RÉSULTATS

3.1. Résultats des émissions des poussières pendant la première période d'étude

(22 mars - 5 avril 2017)

Les résultats de ce contrôle et les mesures effectuées durant la période allant du 22 mars jusqu'au 20 avril sont présentés dans le tableau 2.

3.2. Les émissions des poussières pendant la deuxième période

Le bac 2' a été déposé du 18 avril au 28 avril, les mesures durant cette période sont indiquées dans le tableau 3.

Ces calculs ont été effectués pour évaluer la variation de ces émissions dans le temps. Une représentation graphique des taux d'émission a été réalisée et présentée sur la figure 2.

Le taux d'émission des poussières présente une évaluation aléatoire. En effet, le taux enregistré pour la première journée de mesure a été de 236 093 mg/m²/j. La valeur a augmenté pour la deuxième journée de mesure pour atteindre 405 318 mg/m²/j, puis commence à diminuer les journées suivantes pour arriver à 325 121 mg/m²/j.

Tableau 2: Les résultats du contrôle du 22 mars au 5 avril pour le bac 2

Date	Poussière récupérée (mg)	Temps d'exposition en minute		Taux d'émission en mg/m ² /j
		Partiel	Cumulé	
24-mars	5200	2727	2727	32699
27-mars	20100	4328	7055	48856
29-mars	30700	2859	9914	53102
31-mars	63500	2867	12781	85197
03-avr	86400	5816	18597	79669
05-avr	90200	2803	21400	72279

Les fluctuations observées dans les résultats indiquent que le taux d'émission de poussières dans cet atelier est fortement influencé par plusieurs facteurs interdépendants. Les conditions de travail (intensité et durée des opérations), l'état de maintenance des équipements (usure, fuites ou défauts d'étanchéité), les conditions climatiques (vent, humidité, température) ainsi que les interventions humaines (manipulations, ouvertures de trappes, nettoyage) jouent un rôle déterminant dans l'ampleur des émissions. Ainsi, toute variation de ces paramètres peut directement impacter la quantité de poussières générée et libérée dans l'environnement.

3.3. Comparaison aux exigences nominales :

3.3.1. Pendant la première période d'étude

• Comparaison avec la Norme AFNOR NF-X43-007

Les résultats trouvés pour la totalité des stations d'étude (dans les deux ateliers), ont subi une comparaison avec la valeur de la Norme adaptée (tableau 4).

Ce tableau montre que les taux des émissions de poussières dans les différentes stations des ateliers de broyage et ensachage expédition sont supérieurs à la norme, les écarts avec la valeur de la norme AFNOR NF-X43-007 (1000mg/m²/j) est conséquent.

• Comparaison avec de donnée antérieur

Les résultats d'émission des poussières durant la période d'expérience ont été comparé avec une valeur enregistrée dans une maison de la ville de Bizerte (tableau 5), la valeur enregistrée est de 536 mg/m²/j [18]. Ce tableau montre les taux des émissions de poussières à plusieurs lieux dans les ateliers de broyage et ensachage expédition, et leurs écarts avec le milieu vivable à Bizerte.

3.3.2. Pendant la deuxième période d'étude

• Comparaison avec la Norme AFNOR NF-X43-007

La comparaison de tous les résultats trouvés dans la totalité des stations d'étude avec la norme AFNOR NF-X43-007 est présentée dans le tableau 6.

Les résultats de la comparaison par l'écart éprouvent que les taux des émissions des poussières dans les différentes stations des ateliers de broyage et ensachage expédition sont supérieurs à la norme AFNOR NF-X43-007 (1000mg/m²/j).

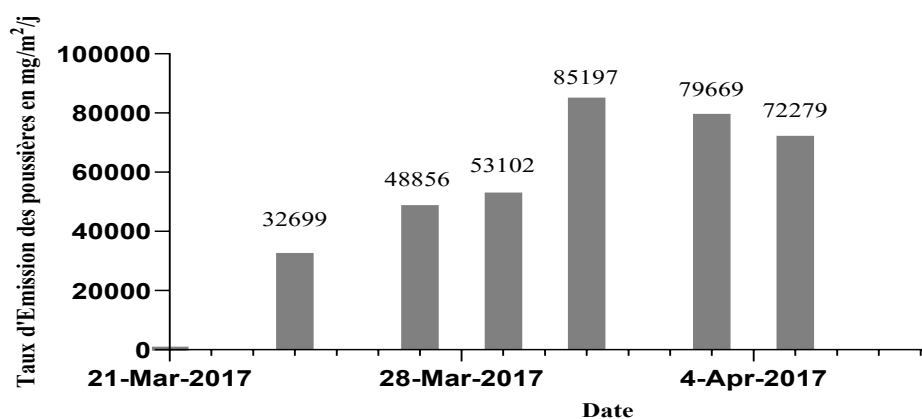


Figure 1 : Taux d'Emission des poussières dans l'atelier broyage ciment durant la période du 22 mars au 05 avril en mg/m²/j

Tableau 3: Les résultats du contrôle du 18 avril au 28 avril pour le bac 2

Date	Poussière récupérée (mg)	Temps d'exposition en minute		Taux d'émission en mg/m ² /j
		Partiel	Cumulé	
20-avr	41500	2997	2997	236093
24-avr	207700	5740	8737	405318
26-avr	263800	2861	11598	387805
28-avr	274400	2792	14390	325121

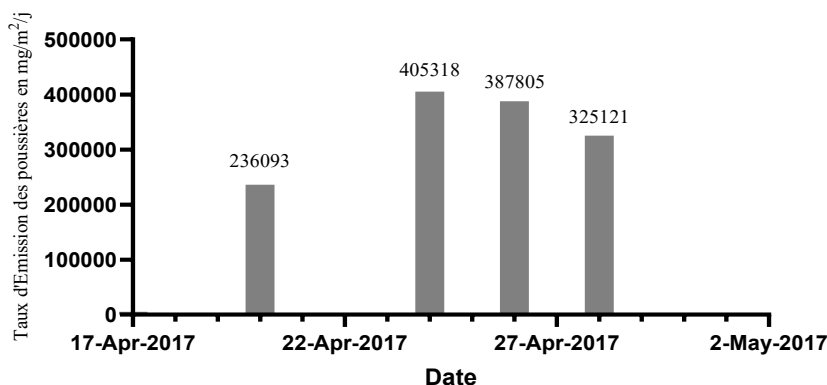


Figure 2: Taux d'émission des poussières dans l'atelier du broyage ciment durant la période 18 avril à 28 avril en mg/m²/j

• Comparaison avec de donnée antérieure

Les résultats des émissions de poussières durant la deuxième période d'expérience ont été comparés avec la valeur enregistrée dans une maison de la ville de Bizerte (tableau 7), qui a été de 536 mg/m²/j [18].

Ce tableau montre les résultats des taux des émissions de poussières à différentes stations dans les ateliers de broyage et ensachage expédition, et leurs écarts avec le milieu vivable de la ville de Bizerte.

Les taux des émissions de poussières dans les différentes stations sont supérieurs à la valeur enregistrée au centre de la ville de Bizerte, qui est de 536 mg/m²/j [18].

3.4. Résultats des analyses chimiques

Les poussières recueillies et ayant un poids dépassant 30 g ont fait l'objet d'une analyse chimique effectuée par le système XRF sur pastilles, après avoir été analysée par calcination pour déterminer la perte au feu. Le tableau 8 regroupe les résultats des analyses effectuées au niveau des sites étudiés. Il présente les résultats de la perte au feu dans sa totalité, dans les deux ateliers et pendant les deux périodes d'expérimentation.

Le taux élevé de CaO dans la poussière de ciment, détecté par fluorescence X et confirmé par la perte au feu (tableau 11), reflète la forte concentration de phases calciques caractéristiques du clinker de ciment. Ce CaO, stable à haute température, contribue à l'alcalinité des poussières, qui peut provoquer des irritations

Tableau 4: comparaison des émissions de poussières durant la période 18 mars – 4 avril avec la norme AFNOR NF-X43-007

Lieux	Résultats en mg/m ² /j	Norme		
		Valeur en mg/m ² /j	Ecart en valeur en mg/m ² /j	Ecart en %
Début d'élévateur	83834	1000	82834	828,34
Ensacheuse	793776		792776	7927,76
Trémie d'ensacheuse	34761		33761	337,61
Crible et filtre	36428		35428	354,28
Fin d'élévateur	30780		29780	297,8
Sortie du broyeur du ciment	101697		100697	1006,97
Entrée du broyeur du ciment	61967		60967	609,67
1 ^{er} étage au-dessus du broyeur	1585403		1584403	15844,03
Filtre de procès	170311		169311	1693,11

Tableau 5: Comparaison des émissions de poussières avec la valeur enregistrée dans le milieu vivable de la ville Bizerte

Lieux	Résultats en mg/m ² /j	Bizerte		
		Valeur en mg/m ² /j	Ecart en valeur en mg/m ² /j	Ecart en %
Début d'élévateur	83834	536	83298	832,98
Ensacheuse	793776		793240	7932,4
Trémie d'ensacheuse	34761		34225	342,25
Crible et filtre	36428		35892	358,92
Fin d'élévateur	30780		30244	302,44
Sortie du broyeur du ciment	101697		101161	1011,61
Entrée du broyeur du ciment	61967		61431	614,31
1er étage au-dessus du broyeur	1585403		1584867	15848,67
filtre de proses	170311		169775	1697,75

Tableau 6: Comparaison des émissions de poussières durant la période 18 avril – 28 avril avec la norme AFNOR NF-X43-007

Lieux	Résultats en mg/m ² /j	Norme		
		Valeur en mg/m ² /j	Ecart en valeur en mg/m ² /j	Ecart en %
Début d'élévateur	138719	1000	137719	1377,19
Ensacheuse	4270019		4269019	42690,19
Trémie d'ensacheuse	42032		41032	410,32
Crible et filtre	41810		40810	408,1
Fin d'élévateur	45603		44603	446,03
Bouche d'extraction	595223		594223	5942,23
Sortie du broyeur du ciment	327239		326239	3262,39
Entrée du broyeur du ciment	338584		337584	3375,84
1er étage au-dessus du broyeur	213179		212179	2121,79

Tableau 7: Comparaison des émissions des poussières avec la valeur enregistrée dans le milieu vivable à Bizerte

Lieux	Résultats en mg/m ² /j	Bizerte		
		Valeur mg/m ² /j	Ecart en valeur mg/m ² /j	Ecart en %
Début d'élévateur	138719	536	138183	1381,83
Ensacheuse	4270019		4269483	42694,83
Trémie d'ensacheuse	42032		41496	414,96
Crible et filtre	41810		41274	412,74
Fin d'élévateur	45603		45067	450,67
Bouche d'extraction	595223		594687	5946,87
Sortie du broyeur du ciment	327239		326703	3267,03
Entrée du broyeur du ciment	338584		338048	3380,48
1ere étage au-dessus du broyeur	213179		212643	2126,43

respiratoires chez les personnes exposées et avoir des effets néfastes sur les sols, les eaux et la végétation environnante. De plus, cette alcalinité favorise la formation de particules secondaires atmosphériques, amplifiant ainsi la pollution particulaire locale.

La représentation graphique suivante (figure 3) présente la variation de la perte au feu au niveau des sites étudiés et pour les deux périodes.

Les résultats trouvés montrent que la poussière obtenue est relative à un ciment de type CEM II AL-32.5N car sa perte au feu a varié de 5 à 10%.

3.5. Recommandations pour diminuer le taux des émissions de poussière dans les deux ateliers

3.5.1. Causes de défaillances

Une équipe de réflexion a été chargée pour répondre à la question « pourquoi le taux d'émission des poussières a été très élevé dans ces deux ateliers ? ».

Le tableau ci-joint (tableau 9) illustre les causes tirées de cette équipe et leurs classifications.

Les causes sont classées en cinq catégories selon les causes des émissions de poussière dans les deux ateliers broyage de ciment et ensachage expédition.

Notre objectif est de traiter les retombements de poussière dans les deux ateliers en se basant sur l'étude des causes des émissions ; car ces retombements sont dans la majorité des cas des ciments dans le dernier stade de fabrication.

Ces retombées peuvent être récupérés et réintroduits dans le cycle de production ; Cette réintroduction présente un bénéfice et réduit le gaspillage.

Tableau 8: Tableau des résultats d'analyse fluorescence aux rayons X et la perte au feu

<i>Eléments chimiques</i>	<i>SiO₂</i>	<i>Al₂O₃</i>	<i>Fe₂O₃</i>	<i>CaO</i>	<i>MgO</i>	<i>SO₃</i>	<i>K₂O</i>	<i>Na₂O</i>	<i>P₂O₅</i>	<i>Perte au feu</i>	<i>Totale</i>
<i>Lieux</i>	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
<i>Sortie du broyeur ciment (2^{ème} période)</i>	18,11	3,77	2,63	62,94	1,05	3	0,38	0,57	0,7	8.62	93,15
<i>Entrée du broyeur ciment (2^{ème} période)</i>	17,14	3,22	2,77	61,73	1,02	2,32	0,34	0,47	0,63	6.63	89,64
<i>1ere étage au-dessus broyeur (2^{ème} période)</i>	17,83	3,69	2,58	62,21	1,01	2,86	0,36	0,53	0,69	9.81	91,76
<i>Sortie du broyeur ciment (1^{ère} période)</i>	17,6	3,58	2,62	62,21	0,98	2,57	0,35	0,5	0,67	5.53	91,08
<i>Entrée du broyeur ciment (1^{ère} période)</i>	17,83	3,69	2,58	62,21	1,01	2,86	0,36	0,53	0,69	8.41	91,76
<i>1ere étage au-dessus broyeur (1^{ère} période)</i>	17,6	3,58	2,62	62,21	0,98	2,57	0,35	0,5	0,67	8.27	91,08
<i>début élévateur ensachage (1^{ère} période)</i>	18,11	3,77	2,63	62,94	1,05	3	0,38	0,57	0,7	9.10	93,15
<i>ensacheuse (1^{ère} période)</i>	17,14	3,22	2,77	61,73	1,02	2,32	0,34	0,47	0,63	6.27	89,64
<i>début élévateur (2^{ème} période)</i>	17,83	3,69	2,58	62,21	1,01	2,86	0,36	0,53	0,69	8.06	91,76
<i>ensacheuse (2^{ème} période)</i>	17,6	3,58	2,62	62,21	0,98	2,57	0,35	0,5	0,67	5.77	91,08

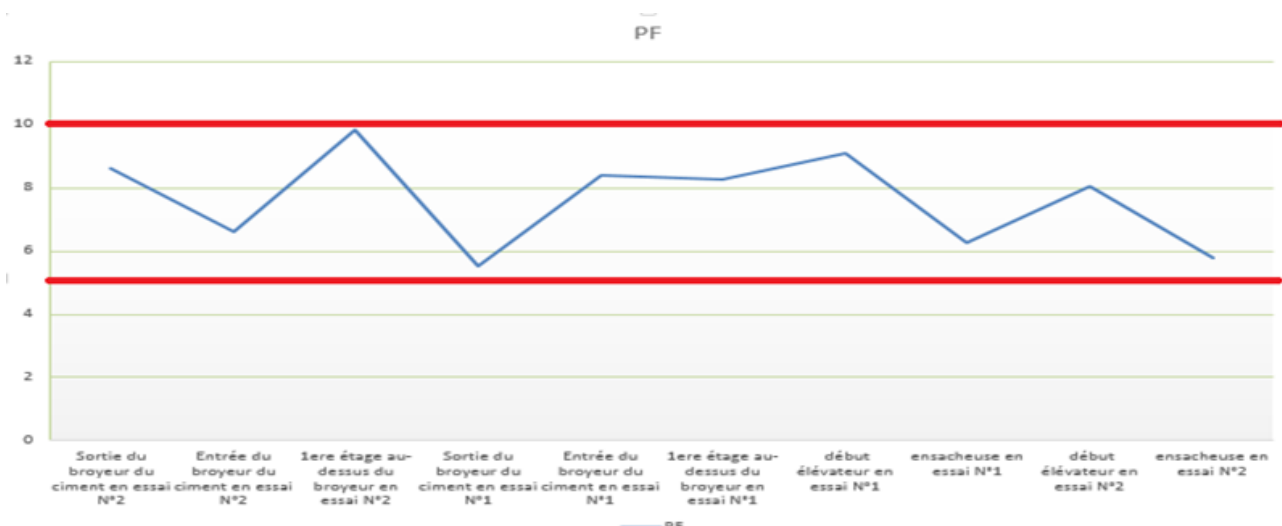


Figure 3 : Variation de la perte au feu au niveau des stations d'étude pendant les 2 périodes

3.5.2. Analyse des Modes de Défaillances, de leurs Effets et de leur Criticité (AMDEC)

➤ Présentation de la méthode AMDEC

Applicable à un produit, un procédé ou un projet, l'AMDEC permet d'optimiser la fiabilité en détectant les erreurs à un stade précoce et en les prévenant. L'AMDEC est une méthode préventive et inductive. Elle consiste à détecter le plus tôt possible les caractéristiques critiques d'un produit ou d'un procédé afin d'engager des actions préventives.

La méthode s'applique au stade de la conception et de l'industrialisation des produits et des procédés.

L'AMDEC peut s'intéresser à :

- Un produit industriel ou de service ;
- Un procédé ;
- Un moyen de production.

➤ Barème de criticité

L'indice de criticité est calculé pour chaque défaillance, à partir de la combinaison de trois critères (tableau 10), par la multiplication de leurs notes respectives :

$$C = G \times F \times D$$

Avec :

Tableau 9: Les causes des émissions de poussières dans les deux ateliers

Matière	Matériel	Méthode	Milieu	Main d'œuvre
<ul style="list-style-type: none"> Quantité de production et livraison Granulométrie Humidité 	<ul style="list-style-type: none"> Maintenance des ateliers Encombrement du milieu Absence des moyens de récupération Manque d'effectif Les points de chute 	<ul style="list-style-type: none"> Marche accidentelle Système de filtration d'air non efficace Encombrement du milieu Gestion de compétence Maintenance curative Dosage des matières 	<ul style="list-style-type: none"> Condition climatique Courants d'air Manque de nettoyage 	<ul style="list-style-type: none"> Manque de discipline Manque de formation Manque de sensibilisation Manque de motivation

- La gravité des conséquences que la défaillance génère (indice G) ;
- La fréquence d'apparition de la défaillance (indice F) ;
- La non-détection de l'apparition de la défaillance, avant que cette dernière ne produise les conséquences non désirées (indice D).

Chacun de ces critères sera évalué avec une table de cotation établie sur 4 niveaux, pour le critère de gravité, pour le critère de fréquence et de non-détection. Le tableau ci-dessous présente le barème de cotation de la criticité utilisée.

Le premier niveau de criticité est basé sur la cotation de la gravité (évaluation de l'ampleur de l'impact et sa réversibilité), alors que le second est basé sur la répétition dans un intervalle de temps précis.

Le dernier niveau de criticité est basé sur les indicateurs des émissions des poussières. Ainsi, pour chaque critère, une note variante entre 1 et 4 sera attribué (le facteur de pondération pour chaque critère est de 4).

➤ Analyse AMDEC

Les causes seront classées selon les barèmes de criticité (tableau 11). Au début nous allons présenter les causes qui sont réellement sans remède, et leur criticité va être conventionnellement considérée égale à 1. Les autres causes seront étudiées, et toute cause ayant une note supérieure à 24 en criticité sera considérée comme significative.

Les valeurs présentées dans le tableau 11 permettront de mesurer les pertinences des causes des problèmes d'émission de poussières en se basant sur la criticité.

Devant l'absence d'historique relatif à ces mesures, la valeur seuil de la criticité a été fixée à 24 qui est le résultat d'une valeur composé d'une cause très grave, une fréquence intermédiaire et détectée par un indicateur indirect.

$$C = 4 \times 3 \times 2 = 24$$

Pour exploiter les résultats de l'analyse AMDEC, on a procédé de la manière suivante : des solutions techniques sont proposées pour réduire la criticité des modes de défaillances pénalisants et par la suite atteindre un taux de disponibilité maximal.

4. DISCUSSION

Les résultats obtenus mettent en évidence des niveaux alarmants d'émission de poussières dans les ateliers industriels, largement supérieurs à la norme AFNOR NF-X43-007 (1000 mg/m²/j). Ces taux témoignent d'un dysfonctionnement structurel et organisationnel nécessitant des mesures correctives urgentes.

Les figures 1 et 2 montrent une variabilité importante des taux d'émission au fil des journées de mesure. Cette fluctuation résulte de multiples facteurs, notamment les conditions de travail, les interventions

Tableau 10: Grille de cotation AMDEC

Gravité (G)	
Note	Critère
1	Effet indirect
2	Effet causant l'émission
3	Origine d'émission
4	Effet direct (émetteur de poussière)
Fréquence (F)	
Note	Critère
1	1 fois/an
2	1 fois/mois
3	1 fois/semaine
4	1 fois/jour
Détectabilité (D)	
Note	Critère
1	Détection avec indicateur approprié
2	Détection par un indicateur indirect
3	Visuelle
4	Non détectable

Tableau 11: Les résultats de criticité

Causes	Remède	G	F	D	C
Les conditions climatiques					
Manque d'effectif					
Gestion des compétences					
Manque de discipline	Pas de remède	1	1	1	1
Manque de formation					
Manque de sensibilisation					
Manque de motivation					
Marche accidentelle	Maintenance préventive	1	1	3	3
Manque de maintenance des ateliers	Maintenance préventive	4	4	4	64
Quantité produites et livrée élevées	Fixée la quantité produite selon la valeur nominale	3	1	1	3
Manque de nettoyage	Renforce l'équipe de nettoyage	4	4	1	16
Système de filtration d'air non efficace	Réparation des filtres (exige une nouvelle étude)	4	4	1	16
Encombrement	Investir une autre ligne	4	4	4	64
Les points de chute	Prolongé les graines de tirage vers le filtre	4	1	1	4
Absences des moyens de récupération à temps	Munir l'atelier d'un aspirateur industriel	4	4	4	64
Les fenêtres sont ouvertes (présence de courant d'air)	Installé des fenêtres commandées par l'équipe de maintenance	4	4	1	16

humaines ponctuelles et la maintenance des machines. Par exemple, les opérations d'ensachage et de manutention augmentent temporairement les taux d'émission. De telles observations corroborent les études de Aalipour et Barabadi (2015) [19], qui ont démontré que l'absence de maintenance préventive aggrave les émissions et réduit la performance des équipements [20].

Les tableaux 4, 5 et 6 révèlent des zones critiques où les émissions atteignent des niveaux extrêmes, comme près de l'ensacheuse (4 270 019 mg/m²/j) et des points de chute des systèmes de transport du ciment (1 585 403 mg/m²/j). Ces valeurs, bien au-delà des seuils réglementaires, indiquent des défaillances majeures dans les systèmes de filtration, souvent liés à l'usure ou au sous-dimensionnement des équipements [21]. En comparaison, les taux relevés dans des milieux vivables comme le centre-ville de Bizerte (536 mg/m²/j) soulignent l'impact environnemental et sanitaire significatif des activités industrielles [18].

L'analyse chimique des poussières montre qu'elles proviennent principalement du ciment de type CEM II AL-32.5N, avec une perte au feu variant entre 5 % et 10 %. Cette caractéristique offre une opportunité de valorisation : les poussières peuvent être récupérées et réintégrées dans le processus de production, limitant ainsi leur dispersion tout en réduisant les déchets industriels [22,23].

Les causes principales de ces émissions excessives sont multiples. Un manque de maintenance préventive, un encombrement des zones de travail, l'absence de systèmes efficaces de récupération des poussières et la dispersion liée aux conditions climatiques sont parmi les facteurs identifiés. L'analyse AMDEC réalisée sur ces ateliers a révélé une criticité supérieure à 24, nécessitant des actions correctives immédiates pour réduire les risques de défaillance [24].

Face à ces défis, des solutions concrètes sont proposées. Tout d'abord, la mise en place d'une politique de maintenance préventive basée sur l'analyse AMDEC permettrait de réduire les défaillances des équipements et d'améliorer leur performance. Ensuite, l'installation de dispositifs modernes de filtration capables de capturer les particules fines est essentielle pour limiter les émissions. La récupération et la réintégration des poussières dans la chaîne de production, notamment pour les ciments de type CEM II AL-32.5N, constituent une approche durable et économiquement viable [22,23]. Par ailleurs, la formation des opérateurs sur les bonnes pratiques et la réorganisation des flux de travail dans les zones critiques contribueraient également à minimiser les émissions ponctuelles et permanentes [18].

En fin, la mise en œuvre de ces mesures, combinée à une surveillance continue des émissions et à l'investissement dans des technologies durables, est cruciale pour réduire l'impact environnemental des

activités industrielles, améliorer les conditions de travail et prolonger la durée de vie des équipements. Ces actions s'inscrivent dans une démarche globale visant à concilier performance industrielle et respect des normes environnementales.

5. CONCLUSION

Les émissions de poussières à la société «Les Ciments de Bizerte» ont dépassé les seuils autorisés, posant des risques pour l'environnement et les travailleurs. Cette étude, menée sur une période de deux mois (mars et avril 2017), a permis de constater que ces émissions sont bien trop élevées dans les ateliers, nécessitant une réhabilitation urgente. Les poussières peuvent être récupérées et réintégrées dans le processus de production. Il est recommandé d'installer un système de filtration de l'air et de réparer les filtres existants. Les ateliers sont en mauvais état, avec des rénovations en retard depuis 2008, et seuls ceux produisant du clinker ont été réhabilités. La maintenance est désormais curative, faute de produits consommables adéquats pour les équipements vieillissants.

REFERENCES

- [1] J. Rockström, W. Steffen, K. Noone, Å. Persson, F. S. Chapin, E. Lambin, T. M. Lenton, M. Scheffer, C. Folke, H. J. Schellnhuber. A safe operating space for humanity. *Nature* 461 (2009) 472–475.
<https://doi.org/10.1038/461472a>
- [2] K. Henni-Chebra, A. Bougara, A. Hallal. Impact des retombées de poussières causées par l'industrie cimentière sur l'environnement. *Communication interne, Université de Chlef* (2013) 8 p.
- [3] S. Goix. Origine et impact des pollutions liées aux activités minières sur l'environnement (eau-sol-atmosphère) et la santé, cas de Oruro (Bolivie). Thèse de doctorat, Université Toulouse III - Paul Sabatier (2012).
- [4] J. A. Foley, R. DeFries, G. P. Asner, C. Barford, G. Bonan, S. R. Carpenter, F. S. Chapin, M. T. Coe, G. C. Daily, H. K. Gibbs. Global consequences of land use. *Science* 309 (2005) 570–574.
<https://doi.org/10.1126/science.1111772>
- [5] D. L. Goetsch, S. B. Davis. *Quality management for organizational excellence*. UpperSaddle River, NJ: Pearson, Vol. 427 (2014).
- [6] AFNOR. NF X43-007. Méthode de mesure des retombées de poussières – Quantification des poussières par récupération sur une surface donnée. *Association Française de Normalisation* (2007).
- [7] G. Oberdörster, Z. Sharp, V. Atudorei, A. Elder, R. Gelein, W. Kreyling, C. Cox. Translocation of inhaled ultrafine particles to the brain. *Inhalation Toxicology* 16 (2004) 437–445.
<https://doi.org/10.1080/08958370490439597>
- [8] C. Turpin. Amélioration des modèles de quantification des émissions particulaires diffuses liées à l'érosion éolienne de tas de stockage de matières granulaires sur sites industriels. Thèse de doctorat, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis (2010). NNT : 2010VALE0010.
- [9] L. Rouil, B. Bessagnet, O. Favez, E. Leoz-Garziandia, F. Meleux. Épisodes de pollution particulaire en France : quels enseignements tirer des récents épisodes ? *Pollution Atmosphérique* NS 8 (2015) 101–114.
- [10] M. Pouponneau, B. Forestier, F. Cape. Les zones à faibles émissions à travers l'Europe : déploiement, retours d'expériences, évaluation d'impacts et efficacité du système. *Rapport ADEME - Rincen Air* (2020) 170 p.
- [11] V. Potocek. Analyse d'aérosols par la méthode PIXE. *Techniques d'analyse* (2003).
<https://doi.org/10.51257/a-v1-p4140>
- [12] Y. Batonneau. Approche physico-chimique des pollutions atmosphériques engendrées par la production pyrométallurgique de plomb et de zinc. Thèse de doctorat, Université Lille 1 (2002).
- [13] A. Djebara. Métrologie des particules ultrafines d'usinage : optimisation de la caractérisation et de la mesure. Thèse de doctorat, École de technologie supérieure, Université du Québec (2012) 132 p.
- [14] R. Ansart. Émission de poussières lors de la manipulation de poudre. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse (2007).
- [15] E. Remoudaki. Étude des processus contrôlant la variabilité temporelle des flux atmosphériques de polluants et de poussières minérales en Méditerranée occidentale. Thèse de doctorat, Université Paris 7 (1990).
- [16] S. Garnaoud, J. M. Mouchel, G. Chebbo, D. R. Thevenot. Caractérisation des retombées atmosphériques de métaux traces en milieu urbain. *TSM. Techniques Sciences Méthodes, Génie Urbain Génie Rural* 5 (2001) 30–40.
- [17] P. Knippertz. Meteorological aspects of dust storms. In: P. Knippertz, J. B. Stuut (Eds). *MineralDust*. Springer, Dordrecht (2014) 121–147. https://doi.org/10.1007/978-94-017-8978-3_6
- [18] S. Chhimi. Étude sur les retombées de poussières dans les milieux industriels de Bizerte. Thèse, Université de Bizerte (2016).
- [19] M. Aalipour, A. Barabadi. Work place factors effect on maintainability in challenging operating conditions. In: *2015 IEEE Int. Conf. on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)*, Singapore (2015) 767–771. <https://doi.org/10.1109/IEEM.2015.7385751>
- [20] J. Chen, Y. Li, Z. Meng, X. Feng, J. Wang, H. Zhou, J. Li, J. Shi, Q. Chen, H. Shi, S. Wang. Study on emission characteristics and emission reduction effect for construction machinery under actual operating conditions using a portable emission measurement system (PEMS). *International Journal of Environmental Research and Public Health* 19 (2022) 9546. <https://doi.org/10.3390/ijerph19159546>
- [21] M. Morgeneyer, C. Bressot. Produits émetteurs potentiels des particules nanométriques ou submicroniques. *Frottement, usure et lubrification* (2018). <https://doi.org/10.51257/a-v1-nm8025>

-
- [22] V. N. Hammade. Caractérisation et valorisation des déchets et sous-produits industriels dans le domaine du génie civil et en technique routière. Rapport de recherche, (2000). ID : 161012325.
- [23] N. Savadogo. Élaboration et caractérisation d'un écociment à base de poudre de mâchefer de charbon minéral. Thèse, INSA de Rennes (2017). NNT : 2017ISAR0013.
- [24] S. Kurniawan, I. Apriliana, S. Wulandari, T. Sukmono. Optimalisasi preventive maintenance ground power unit pada perawatan pesawat udara di PT. IAA AMO menggunakan metode FMEA. *Jurnal Ilmiah Teknik dan Manajemen Industri* 8 (2024). <https://doi.org/10.30737/jatiunik.v8i1.5535>