



(ID Modèle = 454913)

Ineris -231940 - 2825699 - v1.0

**Appui technique de l'Ineris en réponse à la
saisine du BEA-RI à la suite de l'incendie
survenu dans un séchoir à maïs de la société
ALTERNAE sur son site de Génicourt (95) le
17 décembre 2024**

29/04/2025

PRÉAMBULE

Le présent document a été réalisé au titre de la mission d'appui aux pouvoirs publics confiée à l'Ineris, en vertu des dispositions de l'article R131-36 du Code de l'environnement.

La responsabilité de l'Ineris ne peut pas être engagée, directement ou indirectement, du fait d'inexactitudes, d'omissions ou d'erreurs ou tous faits équivalents relatifs aux informations utilisées.

L'exactitude de ce document doit être appréciée en fonction des connaissances disponibles et objectives et, le cas échéant, de la réglementation en vigueur à la date d'établissement du document. Par conséquent, l'Ineris ne peut pas être tenu responsable en raison de l'évolution de ces éléments postérieurement à cette date. La mission ne comporte aucune obligation pour l'Ineris d'actualiser ce document après cette date.

Au vu de ses missions qui lui incombent, l'Ineris, n'est pas décideur. Les avis, recommandations, préconisations ou équivalents qui seraient proposés par l'Ineris dans le cadre des missions qui lui sont confiées, ont uniquement pour objectif de conseiller le décideur dans sa prise de décision. Par conséquent, la responsabilité de l'Ineris ne peut pas se substituer à celle du décideur qui est donc notamment seul responsable des interprétations qu'il pourrait réaliser sur la base de ce document. Tout destinataire du document utilisera les résultats qui y sont inclus intégralement ou sinon de manière objective. L'utilisation du document sous forme d'extraits ou de notes de synthèse s'effectuera également sous la seule et entière responsabilité de ce destinataire. Il en est de même pour toute autre modification qui y serait apportée. L'Ineris dégage également toute responsabilité pour chaque utilisation du document en dehors de l'objet de la mission.

Nom de la Direction en charge du rapport : DIRECTION GENERALE

Rédaction : COLLET Martin

Vérification : BINOTTO GHISLAIN; CHAUMETTE SYLVAIN; STOUVENEL MICKAEL; VIGNES ALEXIS

Approbation : BOUET REMY - le 29/04/2025

Table des matières

1	Introduction	6
1.1	Déontologie	6
1.2	Contexte.....	6
2	Description succincte des installations concernées et des circonstances de l'accident	7
2.1	Description générale du séchoir	7
2.2	Circonstances des événements antérieurs.....	7
2.3	Description succincte de l'évènement du 17 décembre 2024.....	7
3	Réponse aux sollicitations du BEA-RI.....	8
3.1	Influence de "l'âge" (compacité) et de l'épaisseur de la couche de poussière sur l'inflammabilité	8
3.2	Influence du taux d'humidité sur l'inflammabilité de la poussière.....	10
3.3	Influence du taux d'humidité du grain sur la quantité de poussière formée lors du processus de séchage	11
3.4	Influence de la présence d'humidité au sein de la poussière de grain de maïs dont le processus de fermentation pourrait avoir débuté ¹	13
4	Conclusion	14
5	Références.....	16
6	Annexes.....	17

Table des illustrations

Figure 1	: Principe de fonctionnement du séchoir à grain de type « économiseur ».....	7
Figure 2	: Dispositif expérimental de détermination la température minimale d'inflammation en couche de 5 mm selon la norme ISO/IEC 80079-20-2	9
Figure 3	: Détermination de la dimension critique en fonction de la température (nouveau protocole) pour un échantillon de poussière de blé	10
Figure 4	: Observations des dégâts causés par les charançons du maïs sur les grains.....	12
Figure 5	: Evaluation des réglages de la moissonneuse-batteuse sur les différentes catégories d'impuretés	12

Résumé

Le BEA-RI a ouvert le 17 décembre 2024, une enquête sur l'évènement survenu le jour même au sein de la société Alternae située à Génicourt (95).

Deux enquêteurs du BEA-RI se sont rendus sur site. Selon les premiers éléments de l'enquête, l'incendie a pris naissance dans une gaine d'air chaud d'un séchoir à céréales séchant du maïs lors de l'évènement.

Dans la continuité des constats dressés lors de cette visite, l'expertise de l'Ineris a été mobilisée dans le cadre de sa coopération avec le BEA-RI, pour déterminer par la bibliographie un certain nombre de caractéristiques du maïs et des poussières qu'il est susceptible de générer.

Pour citer ce document, utilisez le lien ci-après :

Institut national de l'environnement industriel et des risques, Appui technique de l'Ineris en réponse à la saisine du BEA-RI à la suite de l'incendie survenu dans un séchoir à maïs de la société ALTERNAE sur son site de Génicourt (95) le 17 décembre 2024, Verneuil-en-Halatte : Ineris - 231940 - 2825699 - v1.029/04/2025.

Mots-clés :

BEA-RI, ALTERNAE, Génicourt, Incendie, Séchoir, Maïs, Auto-échauffement.

Glossaire

ATD / ATG : Analyse thermique différentielle couplée à une analyse thermogravimétrique.

ATEX : Atmosphère explosible ou Atmosphère explosive.

BEA-RI : Bureau d'enquêtes et d'analyses - Risques industriels.

ICPE : Installation classée pour l'environnement.

Ineris : Institut national de l'environnement industriel et des risques.

INRS : Institut National de Recherche et de Sécurité.

TAI : Température d'auto-inflammation.

TMI : Température Minimale d'inflammation.

1 Introduction

1.1 Déontologie

Durant ces 10 dernières années, l'Ineris n'a pas réalisé de prestation pour la société ALTERNAE.

1.2 Contexte

Le BEA-RI a ouvert le 17 décembre 2024, une enquête sur l'évènement survenu le jour même au sein de la société Alternae située à Génicourt (95).

Deux enquêteurs du BEA-RI se sont rendus sur site. Selon les premiers éléments de l'enquête, l'incendie aurait pris naissance dans une gaine d'air chaud d'un séchoir à céréales séchant du maïs lors de l'évènement.

Dans la continuité des constats dressés lors de cette visite, le BEA-RI souhaite mobiliser l'expertise de l'Ineris, pour déterminer par la bibliographie un certain nombre de caractéristiques du maïs et des poussières qu'il est susceptible de générer.

En pratique, il est demandé à l'Ineris, en se basant sur la bibliographie d'établir la vraisemblance de l'inflammation d'une couche de poussières de maïs soumise à un flux d'air chaud (120°C) notamment au regard de :

- L'influence de "l'âge" (compacité) et de l'épaisseur de la couche de poussières,
- L'influence du taux d'humidité de la graine sur l'inflammabilité de la poussière,
- L'influence du taux d'humidité de la graine sur la quantité de poussières formée lors du processus de séchage,
- L'influence de la présence d'humidité au sein de la poussière de grain de maïs dont le processus de fermentation pourrait avoir débuté lors du stockage préliminaire.

L'année 2024 a été marquée par une forte humidité, ce qui a entraîné l'arrivée de grains de maïs avec une hygrométrie élevée (teneur en eau entre 35 et 40 % en masse). Dans le séchoir, une combinaison de grains "neufs" et "stockés" a été identifiée, avec un objectif de séchage à environ 15 % en masse d'humidité. La perte de 20 points d'humidité a nécessité des températures élevées et une opération en une seule passe. Plusieurs incendies ont été signalés au cours de l'année 2024.

2 Description succincte des installations concernées et des circonstances de l'accident

2.1 Description générale du séchoir

L'installation impliquée dans cet incendie est un séchoir à maïs de type « économiseur » qui intègre un système de recyclage d'air chaud en partie basse. Ce système permet de réaliser des économies d'énergie en gardant dans le circuit de ventilation une partie des calories apportées par le bruleur à gaz (Figure 1).

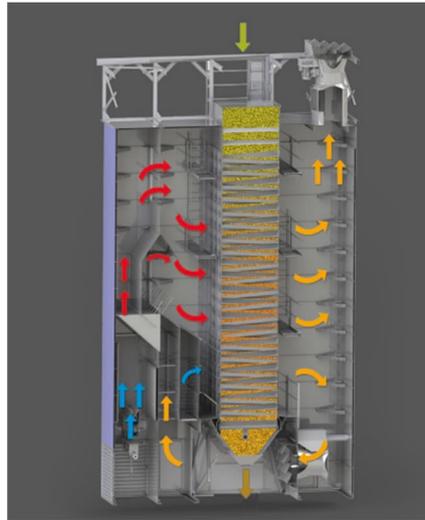


Figure 1 : Principe de fonctionnement du séchoir à grain de type « économiseur »

Cependant, ce recyclage d'air interne peut être à l'origine d'une augmentation de la concentration en poussières fines dans le circuit d'air chaud. En effet, malgré la présence de volets anti-poussières en partie basse, dont le rôle est de rabattre les poussières présentes dans le circuit d'air recyclé sans pour autant les capter, il est alors probable qu'une quantité non-négligeable de poussières fines ait pu être réintroduite dans le circuit d'air chaud.

2.2 Circonstances des événements antérieurs

Plusieurs événements antérieurs à l'évènement survenu le 17 décembre 2024 ont été recensés sur la même installation (ARIA 63047, ARIA 63055). Ces incendies, respectivement survenus les 13 et 23 novembre 2024 ont révélé que l'humidité et la propreté du grain et du séchoir auraient pu avoir un impact sur la survenue de ces incidents.

En effet, lors du premier événement, l'incendie en tête de séchoir est lié à un bouchon de maïs humide en partie haute dans la colonne de grain, côté air usé, soumis à un flux d'air chaud dans le séchoir en fonctionnement.

Lors du second événement, l'incendie serait lié à la présence de poussières au niveau des déflecteurs situés au-dessus des brûleurs, qui auraient chauffé puis basculé dans le caisson de circulation d'air lors du recyclage. De la poussière accumulée entre des panneaux isolants a ensuite pris feu. La présence de poussières au niveau des déflecteurs serait liée à un nettoyage insuffisant à la suite du précédent incendie.

2.3 Description succincte de l'évènement du 17 décembre 2024

Le troisième événement survenu sur cette installation, qui fait l'objet de ce rapport, pourrait avoir pour origine un dépôt de poussières de plusieurs dizaines de centimètres présent dans la partie air chaud au niveau de la colonne de séchage, selon les premiers éléments de l'enquête du BEA-RI. L'analyse menée par l'Ineris vise à explorer la pertinence de ce scénario et notamment à établir la vraisemblance de l'inflammation d'une couche de poussière de maïs soumise à un flux d'air chaud (120°C).

3 Réponse aux sollicitations du BEA-RI

3.1 Influence de "l'âge" (compacité) et de l'épaisseur de la couche de poussière sur l'inflammabilité

L'inflammabilité d'une couche de poussière ne dépend pas seulement de sa composition chimique. Deux paramètres physiques jouent un rôle important : la compacité (ou densité apparente) et l'épaisseur du dépôt.

- **Effet de la compacité**

Lorsqu'une poussière vient d'être déposée, elle est en général peu compacte, l'oxygène peut diffuser assez facilement dans le dépôt de poussières, ce qui va faciliter les réactions d'oxydation, pouvant ainsi faciliter l'inflammation. Avec le temps, ou sous l'effet de vibrations, la poussière se tasse. Elle devient alors plus dense et moins poreuse. Cette compaction réduit la diffusion de l'air au sein du dépôt de poussière, mais améliore la conduction thermique à l'intérieur du dépôt comparativement à un dépôt « frais ». La chaleur se répartit donc mieux, ce qui limite la présence de points chauds.

Ainsi, un dépôt plus compact aura tendance à s'enflammer moins facilement, car il laisse entrer moins d'oxygène, la chaleur s'y répartit plus vite, ce qui évite des températures critiques localisées (points chauds). À l'inverse, une poussière peu compacte (faible masse volumique), favorise une bonne diffusion de l'oxygène mais retient plus facilement la chaleur, l'air étant un mauvais conducteur de chaleur.

Du point de vue de la sécurité industrielle, il convient donc d'évaluer la température d'inflammation d'un dépôt de poussière non compacté afin d'être dans un cas majorant (en l'absence de fermentation qui elle au contraire est favorisée par le compactage et l'activité microbienne dans le cas de la biomasse pour des températures inférieures à 70-80°C).

- **Effet de l'épaisseur du dépôt**

L'épaisseur de la couche de poussière est également un facteur important. Plus une couche est épaisse plus elle peut produire de chaleur par oxydation (dépend du volume du dépôt) et moins elle peut dissiper la chaleur produite vers son environnement (dépend de la surface du dépôt), Ce déséquilibre entre la chaleur produite à l'intérieur du dépôt de poussières et sa capacité à dissiper la chaleur explique pourquoi des couches épaisses ont un risque d'auto-échauffement et d'auto-inflammation plus élevé.

Dit autrement, la température à laquelle un dépôt s'auto-enflamme diminue quand son volume augmente, car la chaleur s'y accumule plus facilement, conformément à ce qui peut être prédit via des modèles d'auto-échauffement classiques (e.g. modèle de Frank-Kamenetskii).

Afin de quantifier la vraisemblance de l'inflammation d'un dépôt de poussière de maïs dans les conditions de l'accident, il conviendrait donc de réaliser un essai en considérant une couche de poussière formée sans compression de la couche, le vieillissement de la couche entraînant une moindre sensibilité à l'inflammation, dans une ambiance chaude.

Classiquement, un essai d'inflammation en couche selon la norme NF EN ISO/IEC 80079-20-2 permet de déterminer la température d'inflammation d'un dépôt de poussière de 5 mm d'épaisseur sans compression de la poussière mais à température ambiante.

La caractérisation de l'inflammation des couches de poussière est réalisée selon la norme ISO/IEC 80079-20-2. Cette évaluation consiste à déposer un échantillon de poussière d'une épaisseur de 5 mm sur une plaque chauffante (voir Figure 2). Son objectif est de déterminer la température maximale de surface des équipements à installer en zone ATEX, afin de prévenir l'inflammation de cette couche, qui pourrait déclencher une explosion ATEX ou un incendie.



Figure 2 : Dispositif expérimental de détermination la température minimale d'inflammation en couche de 5 mm selon la norme ISO/IEC 80079-20-2

L'utilisation de cette donnée pour la prévention de l'auto-échauffement des dépôts de solides divisés/dépôts de poussières en ambiance chaude est fréquente mais non pertinente. En effet, l'essai normalisé selon la norme ISO/IEC 80079-20-2 est effectué en condition ambiante (ambiance froide), ce qui n'est pas représentatif de dépôts de poussière pouvant se retrouver sur des parois de sècheurs.

Afin de répondre à cette problématique, A. Vignes et A. Janès¹ ont développé à l'Ineris un nouveau protocole de mesure de la température d'inflammation des couches en ambiance chaudes. Ce dispositif de plaque chaude en étuve a ainsi permis de mesurer et comparer les températures d'inflammation en ambiance chaude et froide pour différents composés (blé, charbon, cacao, ...).

Les résultats indiquent que la température critique d'inflammation d'une couche de 5 mm de poussières obtenue en ambiance chaude est inférieure de 60 à 120°C à la température d'inflammation obtenue à température ambiante telle que déterminée classiquement selon la norme NF EN ISO/IEC 80079-20-2. Cette différence s'explique par une moindre dissipation thermique de l'énergie libérée par les réactions d'oxydation du matériau testé, due à la réduction du gradient thermique entre l'échantillon et son environnement en ambiance chaude.

En reprenant les extrapolations effectuées par A. Vignes et A. Janès, une estimation de la température minimale d'inflammation en couche et en ambiance chaude (pour de la poussière de blé) peut être effectuée en utilisant le graphique ci-dessous (Cf. Figure 3).

En considérant, une taille de dépôt de poussières de l'ordre de 10/20 µm, la température critique d'inflammation se situe entre 135 et 155°C. Il est alors probable que ce phénomène soit à l'origine de l'incendie observé sur cette installation. A noter qu'un dépôt de 40 cm de poussière de blé aurait été suffisant pour s'auto-enflammer à 120°C dans les conditions expérimentales.

¹ Agnès Janès, Alexis Vignes, Olivier Dufaud, Ignition temperatures of dust layers and bulk storages in hot environments, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Volume 59, 2019, Pages 106-117

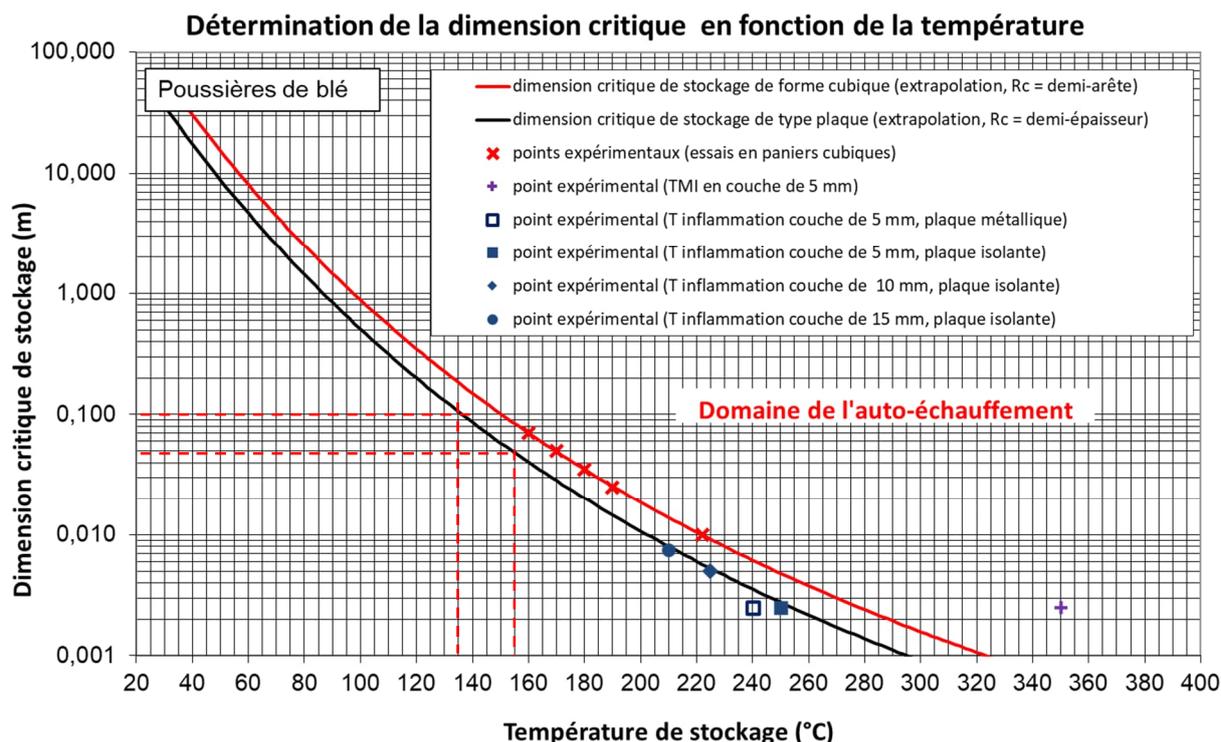


Figure 3 : Détermination de la dimension critique en fonction de la température (nouveau protocole) pour un échantillon de poussière de blé

L'estimation précédente vaut pour un échantillon de poussière de blé. Aucune donnée concernant l'inflammabilité en ambiance chaude d'une couche de poussière de maïs n'est disponible.

Par rapport à l'incendie du séchoir dans une gaine à 120°C et considérant un dépôt de maïs de 10/20 cm, en première approximation et tenant compte des incertitudes de mesures, l'hypothèse d'un auto-échauffement semble probable. L'Ineris recommande toutefois une évaluation expérimentale de la température critique d'auto-inflammation des poussières de maïs dans les conditions de fonctionnement du séchoir (température et épaisseur du dépôt) afin de confirmer cette hypothèse.

En conclusion l'accumulation progressive dans le temps d'une couche de poussières de maïs de 10/20 cm dans une ambiance chaude de la gaine (température et ventilation), menant à une auto-inflammation de cette couche paraît comme une hypothèse très probable de ce scénario accidentel.

3.2 Influence du taux d'humidité sur l'inflammabilité de la poussière²

L'influence de l'humidité de la biomasse sur le processus de séchage a été mise en évidence dans plusieurs études. Une teneur en eau élevée nécessite un apport accru de chaleur pour évaporer l'eau contenue dans la poussière, ce qui ralentit la montée en température. En effet, l'énergie fournie est d'abord mobilisée pour augmenter la température de l'eau contenue dans la graine, retardant ainsi l'élévation de la température du produit, notamment au centre de la graine. Par la suite, l'évaporation se produit de manière soudaine et en grande quantité³.

² Amina Bouzarour. Auto-échauffement d'un lit ventilé de matériaux carbonés : cas du bois torréfié. Génie des procédés. Ecole des Mines d'Albi-Carmaux, 2019. Français. NNT : 2019EMAC0012. tel-02903159.

³ R. B. Bates and A. F. Ghoniem, "Modeling kinetics-transport interactions during biomass torrefaction : The effects of temperature, particle size, and moisture content," *Fuel*, vol. 137, pp. 216–229, Dec. 2014.

Dans le cas d'une particule isolée, une forte humidité peut entraîner un dépassement de la température cible, plus marqué au centre. Pour un empilement de particules, le retard thermique est plus prononcé à la sortie de l'empilement (par rapport au flux d'air chaud). De ce fait, lorsque les réactions de dégradation commencent, le gaz s'est déjà refroidi⁴.

Par ailleurs, il est important de préciser que l'humidité peut modifier la réactivité de surface de certaines matières organiques. Par exemple, en présence d'eau, des produits comme le sucre peuvent développer une couche collante en surface, ce qui influence leur comportement réactif. Il serait pertinent d'approfondir l'étude de cet effet dans le cadre de l'accident survenu.

De manière générale, la teneur en humidité joue un rôle déterminant dans le mécanisme d'auto-échauffement, par plusieurs voies :

- **Au niveau réactionnel** : L'eau peut agir comme catalyseur, favorisant certaines réactions d'oxydation.
- **Au niveau des transferts thermiques** : L'eau, du fait de sa capacité calorifique élevée, participe au stockage et à la dissipation de la chaleur.

Le comportement varie en fonction de la quantité d'eau présente :

- **Faible teneur en eau** : L'humidité est insuffisante pour favoriser l'adsorption optimale de l'oxygène, limitant ainsi les réactions exothermiques.
- **Teneur intermédiaire** : Une humidité modérée permet une adsorption efficace de l'oxygène, ce qui peut entraîner une réaction exothermique intense et accroître le risque d'auto-échauffement.
- **Forte teneur en eau** : Lorsque les espaces interstitiels sont saturés, l'eau limite la diffusion de l'oxygène à l'intérieur du dépôt, freinant alors la réaction d'oxydation.

Concernant les transferts thermiques, dans des conditions de ventilation adéquates, l'évaporation de l'eau permet de limiter la montée en température. Toutefois, en l'absence de ventilation suffisante ou dans des dépôts denses, cette évaporation peut entraîner des zones locales de surchauffe, favorisant à nouveau l'auto-échauffement.

Ainsi, il existe une plage d'humidité "optimale" dans laquelle le risque d'auto-échauffement est maximal. Ce risque est particulièrement élevé lorsque le dépôt de poussières contient une quantité d'eau suffisante pour intensifier les réactions chimiques, mais insuffisante pour permettre une dissipation thermique efficace.

3.3 Influence du taux d'humidité du grain sur la quantité de poussière formée lors du processus de séchage

La présence d'une quantité importante de poussière dans les gaines d'air chaud du séchoir pourrait être due à plusieurs facteurs relatifs à l'humidité élevée de l'année 2024. Ces facteurs sont présentés ci-dessous :

- **Le développement d'insectes ravageurs**. D'après l'Institut technique agricole ARVALIS⁵, l'humidité de l'année 2024 a significativement impacté la prolifération d'insectes ravageurs tels que les héliothis, charançons du maïs ou autres pyrales. Ces insectes sont connus pour décomposer la matière, entraînant la formation de particules de granulométrie plus fine (Cf. Figure 4) qui peuvent restées agglomérées à la surface du grain humide et être entraînées par le flux d'air chaud lors du séchage.

⁴ P. Perré, R. Rémond, I. Turner, A comprehensive dual-scale wood torrefaction model: Application to the analysis of thermal run-away in industrial heat treatment processes, International Journal of Heat and Mass Transfer, Volume 64, 2013, Pages 838-849, ISSN 0017-9310.

⁵https://www.arvalis.fr/sites/default/files/medias/pdf/2025-01/Guide_preco_CHOISIR_mais_2024_2025_Centre_IledeFrance.pdf

Cependant, ce phénomène est plutôt observé après l'opération de séchage et nécessite plusieurs mois pour avoir un impact significatif sur la génération de particules de granulométrie fine. L'hypothèse d'un développement d'insectes ravageurs entraînant une formation de fines entre la récolte et l'opération de séchage apparaît donc peu probable.



Figure 4 : Observations des dégâts causés par les charançons du maïs sur les grains.

- La génération de poussières lors de la récolte/manutention.** D'après ARVALIS⁶, il existe des corrélations entre certains réglages de la moissonneuse batteuse et la génération d'impuretés, casse ou fissure du grain de maïs (Figure 5). Un réglage inadapté produit, en plus des grains brisés, des grains fissurés et des poussières fines. Du chantier de récolte à sa destination finale, le grain subit plusieurs opérations de transfert et de manutention. Lors de la manutention, les grains de maïs ont tendance à générer plus de poussières que d'autres grains⁷ (blé, soja, ...), cela étant dû à la structure interne de son grain, qui se fragmente en particules de tailles aléatoires lors de la casse. Le mauvais paramétrage de certains de ces paramètres lors de la récolte aurait également pu participer à la génération de poussières fines en quantité importante restant adhérentes sur la surface des grains.

Tableau 1 : Evaluation des réglages de la moissonneuse-batteuse sur les différentes catégories d'impuretés (tableau élaboré dans le cadre de la charte qualité maïs classe A)

	Grains brisés	Grains fissurés	Impuretés constituées par des grains	Impuretés diverses	
				Grains avariés, moisés	Matières inertes dont poussières
Régime du batteur	+++	+++			+++
Serrage batteur/contre-batteur	+++	+++	+		++
Vents	+	++	+++	+++	+++
Ouverture grille supérieure					++
Ouverture grille inférieure	++	++	+++		++
Vitesse d'avancement			++		++

Corrélation entre l'organe et la catégorie d'impureté :

+++	Très forte
++	Forte corrélation
+	Faible
	Aucune

Figure 5 : Evaluation des réglages de la moissonneuse-batteuse sur les différentes catégories d'impuretés

- Un grain « sale » entraînant des poussières dans les gaines de ventilation lors de l'étape de séchage.** Les poussières fines émises lors des opérations de récolte ou de manutention peuvent adhérer à la surface des grains humides. Lors du séchage, elles sont entraînées par le flux d'air chaud, augmentant ainsi la charge particulaire en suspension et favorisant une accumulation significative de dépôts dans les gaines, pouvant être supérieure à celle observée les années précédentes.

⁶ [Six paramètres à vérifier pour régler la moissonneuse-batteuse | ARVALIS](#)

⁷ J. M. Boac, R. G. Maghirang, M. E. Casada, J. D. Wilson, Y. S. Jung. (2009). Size distribution and rate of dust generated during grain elevator handling. American Society of Agricultural and Biological Engineers ISSN 0883-8542

En conclusion, l'hypothèse de l'accumulation de quantité de poussières plus importante dans les séchoirs lorsque que la graine est plus humide pourrait être expliquée par le phénomène d'adhérence de plus de poussières au grain humide à l'arrivée dans le séchoir. Ces poussières étant entrainer dans le flux d'air chaud au fur et à mesure que le grain perd en humidité.

3.4 Influence de la présence d'humidité au sein de la poussière de grain de maïs dont le processus de fermentation pourrait avoir débuté¹

En amont du séchage, certains lots de maïs ont été stockés en boudins. Selon les conditions de stockage (durée, température, concentration en oxygène), un processus de fermentation des grains a pu se produire (poches de fermentation selon les conditions de stockage), l'humidité favorisant la croissance des micro-organismes fermentaires.

La majorité des produits agroalimentaires et des végétaux sont susceptibles de se dégrader sous certaines conditions (forte humidité, température élevée, stade de récolte, temps de stockage etc.). Ce phénomène résulte soit de réactions biologiques exothermiques, induites par une activité respiratoire intense des micro-organismes (respiration aérobie), soit de réactions fermentaires produisant des gaz inflammables tels que l'hydrogène (H_2) et le méthane (CH_4). La poussière issue de la fragmentation du maïs est susceptible de fermenter plus facilement que les grains car susceptible de libérer facilement les substrats fermentescibles.

En atmosphère confinée, lorsque la concentration en monoxyde de carbone (CO) dépasse 10 %, l'activité respiratoire est inhibée et la production de chaleur issue de la respiration aérobie diminue. En milieu anaérobie (absence d'oxygène), les processus fermentaires génèrent des gaz inflammables (CH_4 , CO), mais induisent moins de chaleur que la respiration aérobie. Le principal risque associé est alors l'accumulation de ces gaz inflammables et le risque de formation d'une atmosphère explosive en présence d'air, plutôt que l'auto-inflammation des dépôts de poussière.

Au-delà de 70-80°C, la population microbienne décroît rapidement et les réactions exothermiques liées à la respiration aérobie ou à la fermentation cessent.

En conclusion, il est peu probable qu'un processus de fermentation de poussière de maïs en amont du séchoir ait généré l'inflammation de la couche de poussières, le phénomène de fermentation était peu probable dans les conditions de température du séchoir (120°C).

4 Conclusion

L'Ineris a apporté un appui technique en réponse à la saisine du BEA-RI datant du 20/12/2024.

Deux enquêteurs du BEA-RI se sont rendus sur le site concerné par le sinistre. Selon les premiers éléments de l'enquête, l'incendie aurait pris naissance dans une gaine d'air chaud d'un séchoir à céréales séchant du maïs lors de l'évènement.

Dans la continuité des constats dressés lors de cette visite, le BEA-RI souhaite mobiliser l'expertise de l'INERIS, pour déterminer par la bibliographie un certain nombre de caractéristiques du maïs et des poussières qu'il est susceptible de générer :

- 1) **L'influence de « l'âge » et de l'épaisseur de la couche de poussière** : En reprenant les conclusions de l'étude Vignes et Janès, une estimation de la température minimale d'inflammation en couche et en ambiance chaude (pour de la poussière de blé) peut être effectuée. En considérant, une taille de dépôt de poussière de l'ordre de 10/20 cm, la température critique d'inflammation se situe entre 135 et 155°C. Il est alors probable que ce phénomène soit à l'origine de l'incendie observé sur cette installation. A noter qu'un dépôt de 40 cm de poussière de blé aurait été suffisant pour s'auto-enflammer à 120°C dans les conditions expérimentales. D'autres phénomènes comme l'« âge » de la couche et la ventilation ont également pu avoir un impact sur l'apparition de ce phénomène.
- 2) **L'influence du taux d'humidité de la graine sur l'inflammabilité de la poussière** : Dans les conditions de l'accident, l'impact du taux d'humidité de la poussière joue sur le temps d'induction. Plus un produit est humide, plus le temps nécessaire à l'apparition du phénomène d'auto-échauffement est long. L'humidité de la couche a également pu avoir un impact sur les mécanismes réactionnels mis en jeu. Cependant, le dépôt de poussière étant soumis à un flux d'air chaud, son taux d'humidité était certainement assez faible avant l'accident, ce qui limite l'influence de ce paramètre.
- 3) **L'influence du taux d'humidité de la graine sur la quantité de poussière formée lors du processus de séchage** : L'humidité de l'année 2024 pourrait être à l'origine d'une accentuation du phénomène de grain « sale » tel qu'observé dans la synthèse d'accident ARIA N°63047. Ce phénomène pourrait être dû à des poussières fines émises lors des opérations de récolte ou de manutention pouvant adhérer à la surface des grains humides et entraînées ensuite dans le circuit d'air chaud lors du séchage. Ce phénomène, couplé à un mauvais nettoyage de l'installation (ARIA N°63055) pourrait expliquer la présence de dépôts de poussières importants, rendant ces dépôts plus sensibles au risque d'inflammation. De plus, ce type de séchoir dit « économiseur » ne permet pas de traiter une accumulation de la quantité de poussière dans l'air recyclé, entraînant une augmentation de la concentration de poussière dans la partie air chaud.
- 4) **L'influence de la présence au sein de la poussière de grain de maïs dont le processus de fermentation pourrait avoir débuté lors du stockage préliminaire** : Le principal danger associé à la présence de grains de maïs dont le processus de fermentation est la génération de gaz inflammables lors de ce stockage qui démarre lors du stockage préliminaire. Ce phénomène provoque des risques d'explosions des gaz générés. Il apparait difficile de faire un lien entre ce phénomène et l'inflammabilité des grains lors de l'étape de séchage.

Il est à noter que lors de l'utilisation des données issues des Fiches de Données de Sécurité (FDS) ou de résultats expérimentaux, il est essentiel de ne pas les considérer comme des valeurs absolues, mais de les adapter au contexte spécifique du procédé. En effet, les conditions opératoires telles que la température, la pression, l'humidité ou la concentration en oxygène peuvent influencer les propriétés physico-chimiques des substances et modifier les seuils critiques établis normativement. Par exemple, une taille de dépôt élevée peut abaisser le point d'auto-inflammation d'une poussière combustible, tandis qu'une variation de pression peut affecter la concentration limite d'explosivité d'un gaz.

Ainsi, il est indispensable d'intégrer ces paramètres dans l'évaluation des risques afin d'assurer une sécurité optimale lors des opérations industrielles.

Enfin, l'Ineris préconise de suivre les recommandations suivantes pour traiter les grains particulièrement humides⁸ :

- Limiter la température de séchage,
- Procéder à un pré-séchage lorsque l'humidité du grain est supérieure à 22/24 %,
- Procéder à un lavage du grain lorsqu'il est « sale »,
- Mettre en place des tôles inclinées (ou systèmes équivalents) pour limiter l'apparition de dépôts dans les « angles » et points morts de l'installation,
- Mettre en place un programme strict de contrôle et de nettoyage des gaines d'air chaud pour éviter l'accumulation de poussières inflammables. La fréquence doit être adaptée à la production,
- Réaliser des évaluations de risque spécifique « poussières combustibles » avec mise à jour des procédures si besoin,
- Installer des détecteurs spécifiques aux aérosols chauds et aux fumées dans les gaines et les équiper d'un système d'extinction localisé (sprinklage, inertage, ...),
- Sensibiliser, former les opérateurs aux risques liés aux poussières combustibles, à la détection précoce d'incidents et à la conduite à tenir en cas d'alarme.

⁸ Recommandations partiellement issues du Guide pratique pour le séchage des grains en organisme sécheurs, ARVALIS - Institut du végétal - FFCAT

5 Références

Base de données ARIA BARPI. Disponible à : <https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/le-barpi/>

Site internet de ARVALIS, Institut technique agricole : <https://www.arvalis.fr/>

Guide pratique pour le séchage des grains en organisme sécheurs, ARVALIS - Institut du végétal – FFCAT

S. Evanno, J.P. Pineau, J. Chaineaux, R. Lodel, D. Carson (Ineris, 2005). Omega 11 – Connaissance des phénomènes d'auto-échauffement des solides combustibles, Rapport d'étude N° DRA-2005-46055.

Bowes P.C. (1984). Self-heating : evaluating and controlling the hazards, Dept. of the Environment, Building Research Establishment ; Amsterdam ; New York : Elsevier

Agnès Janès, Alexis Vignes, Olivier Dufaud, Ignition temperatures of dust layers and bulk storages in hot environments, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Volume 59, 2019, Pages 106-117.

P. Nordon, "A model for the self-heating reaction of coal and char" *Fuel*, vol. 58, no. 6, pp. 456–464, 1979.

A. Bouzarour. Auto-échauffement d'un lit ventilé de matériaux carbonés : cas du bois torréfié. Génie des procédés. Ecole des Mines d'Albi-Carmaux, 2019. Français. NNT : 2019EMAC0012. tel-02903159.

R. B. Bates and A. F. Ghoniem, "Modeling kinetics-transport interactions during biomass torrefaction : The effects of temperature, particle size, and moisture content," *Fuel*, vol. 137, pp. 216–229, Dec. 2014.

P. Perré, R. Rémond, I. Turner, A comprehensive dual-scale wood torrefaction model: Application to the analysis of thermal run-away in industrial heat treatment processes, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Volume 64, 2013, Pages 838-849, ISSN 0017-9310.

J. M. Boac, R. G. Maghirang, M. E. Casada, J. D. Wilson, Y. S. Jung. (2009). Size distribution and rate of dust generated during grain elevator handling. *American Society of Agricultural and Biological Engineers* ISSN 0883-8542

6 Annexes

Liste des annexes :

- Annexe 1 : Lettre de saisine du BEA-RI du 20/12/2024 – 1 page ;
- Annexe 2 : Equations de production et déperdition de chaleur – 1 page.

Annexe 1

Lettre de saisine du BEA-RI du 20/12/2024

1 page

Mission conjointe BEA-RI - INERIS

Le BEA-RI a ouvert le 17 décembre 2024 une enquête sur l'évènement survenu le jour même au sein de la société Alternae située à Génicourt (95).

Deux enquêteurs du BEA-RI se sont rendus sur site. Selon les premiers éléments de l'enquête, l'incendie a pris naissance dans un séchoir à céréales séchant du maïs lors de l'évènement.

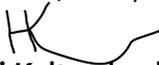
Dans la continuité des constats dressés lors de cette visite, nous souhaiterions mobiliser l'expertise de l'INERIS, dans le cadre de sa coopération avec le BEA-RI, pour déterminer par la bibliographie un certain nombre de caractéristiques du maïs et des poussières qu'il est susceptible de générer.

En pratique, il est demandé à l'INERIS, en se basant sur la bibliographie d'établir la vraisemblance de l'inflammation d'une couche de poussière de maïs soumise à un flux d'air chaud (120°C) notamment au regard de :

- L'influence de "l'âge" (compacité) et de l'épaisseur de la couche de poussière,
- L'influence du taux d'humidité de la graine sur l'inflammabilité de la poussière,
- L'influence du taux d'humidité de la graine sur la quantité de poussière formée lors du processus de séchage.
- L'influence de la présence au sein de la poussière de grain de maïs dont le processus de fermentation pourrait avoir débuté lors du stockage préliminaire.

Nous souhaiterions pouvoir disposer de vos conclusions au travers d'une courte note (au format pdf) selon un calendrier qui sera défini entre vos équipes et les enquêteurs en charge de l'affaire.

Fait à la Défense, le 20/12/2024



Henri Kaltembacher

Annexe 2

Equations de production et déperdition de chaleur (tiré de l'Omega 11)

1 page

EQUATION D'ARRHENIUS

L'équation suivante (1) permet de calculer la vitesse de la réaction, en admettant que cette dernière soit indépendante de la consommation du solide combustible (l'ordre partiel de la réaction est égal à zéro) :

$$\frac{dQ}{dt}(1) = V.Hr.A.(P\%O_2)^n . e^{\left(-\frac{E}{RT}\right)} \quad (1)$$

où :

- dQ/dt (1) : puissance générée (W),
- V : volume de produit mis en œuvre (m^3)
- Hr : chaleur de réaction (J/mole d' O_2)
- A : facteur pré-exponentiel de la loi d'Arrhenius (mole d' $O_2/m^3/s$),
- $P\%O_2$: pression partielle d'oxygène dans l'air (sans dimension),
- n : ordre partiel de la réaction par rapport à l'oxygène,
- E : énergie d'activation de la réaction (J/mole),
- R : constante des gaz parfaits (J/mole/K),
- T : température (K).

EQUATION DE NEWTON

L'augmentation de la température est également liée aux déperditions de chaleur, obéissant à la loi de Newton (2). Dans une première approximation, il est possible de considérer que :

$$\frac{dQ}{dt}(2) = hS \cdot (T - Ta)$$

où :

- dQ/dt (2) : puissance dissipée (W), qui décrit l'évolution de la température dans le temps dans un volume donné, qui est déterminée par le transfert de chaleur dû à la convection à l'extérieur du matériau,
- h : coefficient global d'échange du stockage ($W/m^2/^\circ C$),
- S : surface d'échange (m^2),
- T : température du stockage ($^\circ C$),
- Ta : température ambiante ($^\circ C$).

Pour un stockage de masse m , le coefficient de perte de chaleur correspond au terme hS/m et est indépendant de la température initiale.

