



(ID Modèle = 454913)

Ineris - 222994 - 2778825 - v1.0

04/12/2023

Appui technique de l'Ineris en réponse de la saisine BEA RI suite à l'explosion du 06 janvier 2023 dans un silo de stockage de la société CRISTAL-UNION sur son site de Bazancourt (51)

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 : CANDE RAPHAEL; LECOQ GUILLAUME; EVANNO SEBASTIEN

Vérification : STOUVENEL MICKAEL; LEPRETTE EMMANUEL; LE-ROUX BENJAMIN; CHAUMETTE SYLVAIN

Approbation : Document approuvé le 04/12/2023 par PIQUETTE BERNARD

Table des matières

1	Introduction	5
1.1	Déontologie.....	5
1.2	Contexte	5
2	Description succincte du silo accidenté et des circonstances de l'accident	6
2.1	Description générale du silo de stockage.....	6
2.2	Circonstances des événements du 6 janvier 2023.....	7
2.3	Principaux dégâts dans le silo	7
3	Analyse de l'Ineris	9
3.1	Essais de caractérisation de l'inflammabilité d'un échantillon de luzerne fourni par l'industriel CRISTAL-Union	9
3.2	Reconstitution du mécanisme accidentel dans la cellule	13
3.2.1	Examen et discrimination entre les hypothèses d'une inflammation de poussière de luzerne et d'une inflammation de gaz de pyrolyse	13
3.2.2	Détermination de la cohérence entre l'inflammation en fond de cellule et les observations constatées	16
3.2.3	Détermination globale de l'énergie d'explosion produite et de la quantité de poussière mise en jeu	25
3.4	Revue des recommandations inspirées de l'expérience des céréaliers sur la gestion de l'auto-échauffement et la prévention des effets de voûte et de bâtissage sur les parois	26
3.4.1	Retour d'expérience et phénomènes dangereux associés aux installations de mise en œuvre de luzerne	26
3.4.2	Revue des recommandations sur la gestion d'auto-échauffement.	28
4	Conclusions	34
5	Annexes.....	37

Résumé

Ce rapport a pour objet de répondre à une sollicitation du BEA-RI faite à l'Ineris le 15/05/2023 (cf. saisine du BEA-RI en annexe 1). Celle-ci concerne l'enquête sur l'explosion accidentelle du 06 janvier 2023 dans un silo de stockage de la société CRISTAL-UNION sur son site de Bazancourt (51).

L'objet de ce rapport consiste à répondre aux questions posées par le BEA-RI relatives à :

- l'évaluation de la réactivité de la luzerne à l'auto-échauffement :
 - o Réaliser des essais de caractérisation de l'inflammabilité d'un échantillon de luzerne fourni par l'industriel.
- la reconstitution du mécanisme accidentel dans la cellule :
 - o Déterminer la cohérence entre l'inflammation en fond de cellule et les observations constatées,
 - o Déterminer l'énergie de l'explosion,
 - o Évaluer les quantités de poussière ou de gaz de pyrolyse mises en jeu et examiner les hypothèses d'une inflammation de poussières ou de gaz.
- La réalisation d'une revue des recommandations inspirées de l'expérience des céréaliers sur la gestion de l'auto-échauffement et la prévention des effets de voûte et de bâtissage sur les parois.

Pour citer ce document :

Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques, Saisine BEA RI suite à l'explosion du 6 janvier 2023 au sein d'un silo de stockage de la société CRISTAL-UNION sur son site de Bazancourt (51), Verneuil-en-Halatte : Ineris - 222994 - 2778825 - v1.0, 04/12/2023.

Mots-clés :

Auto-échauffement, Bazancourt, BEA-RI, combustible, déontologie, explosion, ICPE, poussière, pulvérulent, saisine, silo, stockage.

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 5 dernières années, l'Ineris n'a réalisé qu'une seule prestation pour le groupe Cristal Union et ce pour un autre site que le site de Bazancourt (51) et sur un autre type de silo.

À noter que l'Ineris a réalisé, avant ces 5 dernières années, des études de dangers pour le site de Bazancourt (51) qui ne couvraient pas les silos incriminés dans l'accident qui s'est produit le 06/01/2023.

1.2 Contexte

Une explosion s'est produite le 6 janvier 2023 dans un silo de stockage de luzerne d'un site industriel (ICPE soumise à autorisation) situé à Bazancourt (51) et exploité par la société CRISTAL-UNION. Le silo de stockage de luzerne est constitué d'un ensemble de 15 cellules cylindriques béton verticales identiques accolées. La cellule impliquée dans l'explosion a la forme d'un cylindre de 40 m de haut et 8 m de diamètre. Les principaux dégâts ont été relevés au niveau supérieur du silo.

Le BEA-RI a décidé le 10 janvier 2023 d'ouvrir une enquête sur l'accident et a souhaité mobiliser l'expertise de l'Ineris (via une lettre de saisine du 15/05/2023 présentée en Annexe 1) pour :

- Évaluer la réactivité de la luzerne à l'auto-échauffement :
 - o Réaliser des essais de caractérisation de l'inflammabilité d'un échantillon de luzerne fourni par l'industriel.
- Reconstituer le mécanisme accidentel dans la cellule :
 - o Déterminer la cohérence entre l'inflammation en fond de cellule et les observations constatées (jet de poussière, rupture dalle béton, puis explosion secondaire horizontale en tête),
 - o Déterminer globalement l'énergie d'explosion produite,
 - o Examiner les hypothèses d'une inflammation de poussières ou de gaz et évaluer les quantités de poussière ou de gaz de pyrolyse mises en jeu.
- Réaliser une revue des recommandations inspirées de l'expérience des céréaliers sur la gestion de l'auto-échauffement et la prévention des effets de voûte et de bâtissage sur les parois.

Cette expertise s'est notamment appuyée sur des essais en laboratoire selon des protocoles qui ont été présentés aux enquêteurs. Ces essais ont été réalisés à partir des échantillons définis par le BEA-RI et expédiés à l'Ineris par l'industriel.

Durant la réalisation de cette expertise confiée à l'Ineris, des échanges réguliers ont été menés entre le BEA-RI et l'Ineris :

- un échange téléphonique le 10 janvier 2021,
- une réponse par courriel le 06 mars 2023 de l'Ineris au courriel du 1^{er} Mars 2023 des premiers éléments reçus par le BEA RI,
- une réunion en visioconférence entre le BEA-RI et l'Ineris le 06 mars 2023 et le 20 mars 2023 validant la saisine du BEA-RI auprès de l'Ineris,
- des documents techniques reçus par le BEA-RI par courriels les 01 mars 2023, 14 mars 2023, 20 mars 2023 et 07 avril 2023,
- des échanges téléphoniques et des réunions en visioconférence réguliers.

2 Description succincte du silo accidenté et des circonstances de l'accident

Les descriptions présentées dans ce chapitre résultent des échanges avec le BEA-RI et sont basées sur les documents transmis par le Bureau, l'Ineris ne s'étant pas rendu sur place et n'ayant pas échangé directement avec l'industriel.

2.1 Description générale du silo de stockage

Le silo concerné par l'accident est un silo de stockage en béton armé de 50 m de long (incluant la tour de manutention) et 25 m de large, composé de 15 cellules cylindriques verticales avec base conique disposées en 5 rangées de 3 cellules, tel que présenté sur la vue satellite en Figure 1, de 8 as de carreau, d'une tour de manutention située à une des extrémités du silo, d'une galerie sur cellules et de trois galeries sous cellules (une galerie par rangée de cellules).

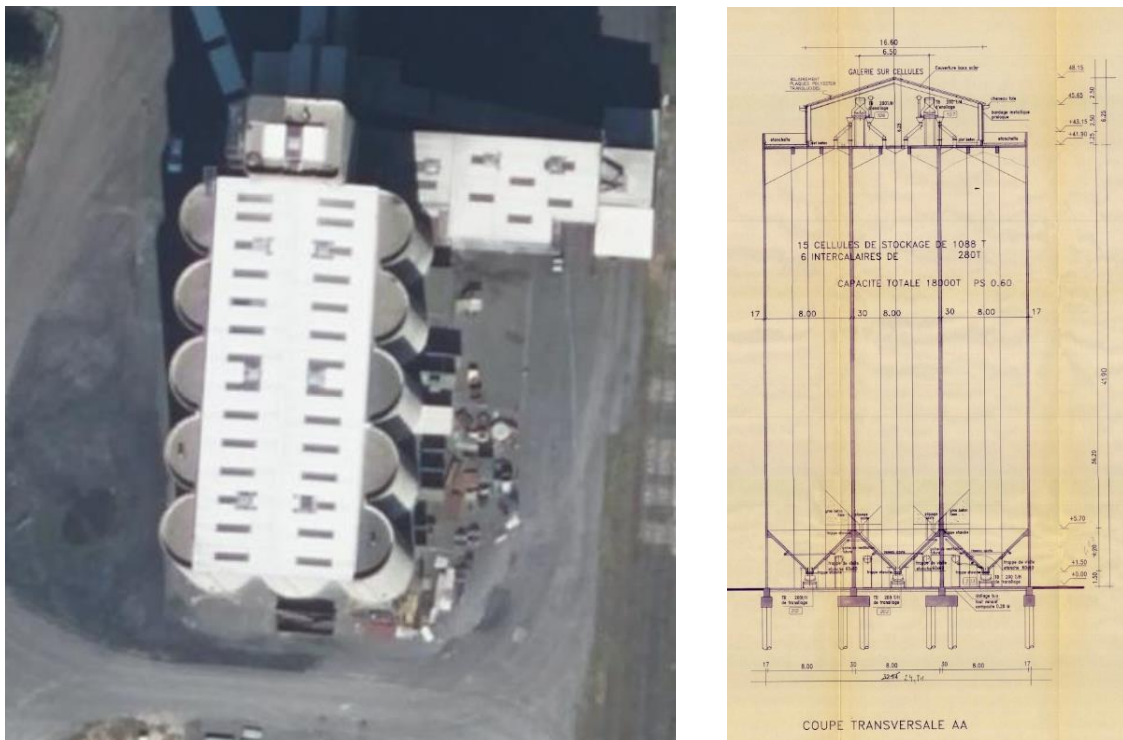


Figure 1 : Vue satellite du silo (à gauche) et vue en coupe transversale du silo (à droite)

Chaque cellule mesure 40 m de haut (dont 4 m de haut pour la base conique), avec un diamètre de 8 m, tel que présenté à la figure 1.

La galerie sur cellules est une structure composée d'une charpente métallique et de bardages métalliques en façade et en toiture. Elle est équipée de 2 transporteurs à bande qui alimentent les 15 cellules.

Chaque galerie sous cellules est équipée d'un transporteur à bande chargé de récupérer le contenu des cellules de la rangée correspondante.

La cellule dans laquelle s'est produit l'accident est située à l'extrémité opposée à la tour de manutention, au centre de sa rangée, et est référencée C20 dans le plan de masse en Figure 2. Elle est encadrée, sur sa rangée, par les cellules C19 et C21.

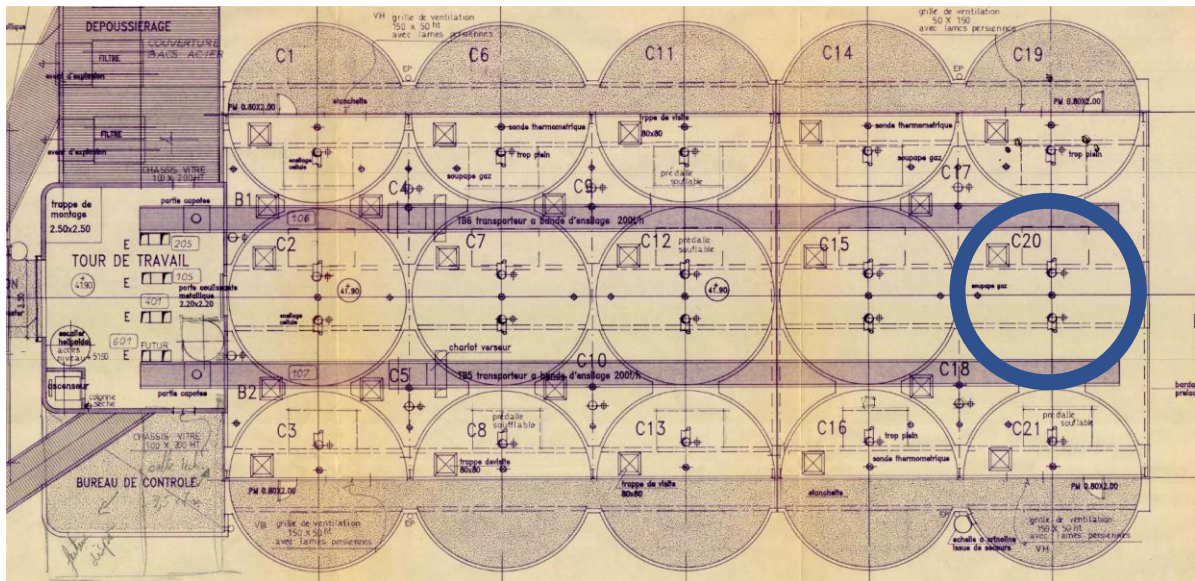


Figure 2 : Plan de masse du silo, la cellule C20 étant entourée par un cercle bleu

2.2 Circonstances des événements du 6 janvier 2023

Le 6 janvier 2023, jour de l'accident, de la luzerne était présente en faible quantité dans la cellule C20. En effet, la cellule avait été vidangée au cours du mois de décembre, mais une inhabituelle épaisseur de granulés et de poussières restait agglomérée sur sa paroi, selon les déclarations de l'exploitant.

Ainsi, les jours précédant l'accident, un bâttissage de luzerne de quelques mètres de haut avait été observé sur les parois latérales de la cellule C20 selon les informations fournis par l'industriel.

La veille de l'accident :

- Du granulé de luzerne avait été repassé par le haut de la cellule afin d'abattre le dépôt de poussière au niveau des parois. Cette tentative n'a cependant pas fonctionné ;
- En fin de poste, le produit était à température ambiante d'après une grappe de sondes sur l'axe de la cellule.

Le jour de l'accident, au matin :

- Une montée en température est relevée par les différents capteurs en amont de l'accident (dernières températures relevées : de l'ordre de 50 °C) ;
- Un débâtissage de la luzerne se serait produit, suivi par une explosion.

2.3 Principaux dégâts dans le silo

D'après les différentes informations (notamment photographiques) transmises par CRISTAL-UNION (mails du 20/03/2023 et du 07/04/2023 du BEA-RI), les principaux dégâts relevés se situent en partie haute du silo, au niveau du plancher et de la galerie sur cellules.

Les photographies post-accidentelles prises avant le retrait des éléments de bardages en toiture et en façade de la galerie métallique sur cellules, comme celles présentées en Figure 3, montrent des éléments de bardages déformés de manière irréversible et des fixations arrachées, principalement au niveau de la cellule C20.



Figure 3 : Prise de vue du sommet du silo après l'accident du 6 janvier 2023 et avant le retrait des éléments de bardages de la galerie sur cellules [photo transmise par le BEA-RI]

Les photographies post-accidentelles prises après retrait des éléments de bardages de la galerie sur cellules ont également montré que le plancher sur la cellule accidentée C20 et sur les cellules voisines C19 et C21 présentait des dégâts importants avec de nombreuses fissures et ruptures. Les éléments de dalles semblent s'être soulevés et être retombés sur place.



Figure 4 : Prise de vue du sommet du silo après l'accident du 06 janvier 2023 et le retrait des éléments de bardages de la galerie sur cellules [photo transmise par le BEA-RI]

3 Analyse de l'Ineris

Pour répondre aux questions posées par la saisine du BEA-RI du 15/05/2023 (cf. **Annexe 1**), l'analyse de l'Ineris a été réalisée en trois étapes :

- Étape n°1 : Évaluer la réactivité de la luzerne à l'auto-échauffement ;
- Étape n°2 : Reconstituer le mécanisme accidentel dans la cellule ;
- Étape n°3 : Réaliser une revue des recommandations inspirées de l'expérience des céréaliers sur la gestion d'auto-échauffement et la prévention des effets de voûte et de bâtissage sur les parois.

Chacune de ces étapes sont traitées et détaillées ci-après.

3.1 Essais de caractérisation de l'inflammabilité d'un échantillon de luzerne fourni par l'industriel CRISTAL-Union

L'échantillon fourni par la société CRISTAL-UNION a été réceptionné dans les laboratoires à l'Ineris le 05/04/2023 et a été identifié de la façon suivante :

- référence CRISTAL-UNION « Luzerne » - référence Ineris 23AM101 (cf. Figure 5).



Figure 5 : Vue des trois sacs contenant l'échantillon CRISTAL-UNION « Luzerne » - référence Ineris 23AM101

Les résultats des essais sont reportés ci-après (Tableau 1)

Les résultats des mesures d'essais sont présentés en Annexe 2.

La description des essais est présentée en Annexe 3.

Essai (Référentiel)	Échantillon Réf. CRISTAL-UNION « Luzerne » - référence Ineris 23AM101	Observation / Commentaire / Interprétation / Conclusion
Granulométrie mécanique	<p>> 1 mm : 96,4 % 1 mm – 500 µm : 2 % 500 µm – 315 µm : 0,5 % <315 µm : 1,1 % Fond : 0 %.</p>	<p>L'échantillon présente peu de fines pulvérulentes combustibles (1,6 % < 500 µm) sujettes à la formation d'ATEX poussière en cas de mise en suspension dans l'air. Par contre, cet échantillon contient une forte quantité de matière non pulvérulentes combustibles (98,4 % > 500 µm) peu sujettes à la formation d'ATEX poussière en cas de mise en suspension dans l'air.</p> <p>Remarque Ineris : La question se pose si l'échantillon testé contenant très peu de fines est réellement représentatif de la luzerne présente dans le silo avant l'explosion du 06/01/2023, car sur la base des vidéos de l'explosion du silo transmises par la société CRISTAL UNION, on aperçoit des fines en quantité non négligeable.</p>
Taux d'humidité	8,41 %	L'échantillon présente un faible taux d'humidité.
Teneur de friabilité	<p>Essai au tambour de friabilité : - Moyenne de friabilité : 0,28 %</p> <p>Granulométrie de l'échantillon après passage dans le Tambour de friabilité : > 1 mm : 88,7 % 1 mm – 500 µm : 4,3 % 500 µm – 315 µm : 2,1 % 315 µm – 180 µm : 1,8 % 180 µm – 100 µm : 1,6 % 100 µm – 63 µm : 0,7 % 63 µm – 40 µm : 0,5 % 40 µm – 32 µm : 0,3 % Fond : 0 %.</p>	L'échantillon présente une faible propension à la friabilité.
Teneur d'abrasion	<p>Essai au tambour d'abrasion : - Moyenne d'abrasion : 0,66 %</p> <p>Granulométrie de l'échantillon après passage dans le tambour d'abrasion : > 1 mm : 87,9 % 1 mm – 500 µm : 4,8 % 500 µm – 315 µm : 2,1 % 315 µm – 180 µm : 1,9 % 180 µm – 100 µm : 1,5 % 100 µm – 63 µm : 0,8 % 63 µm – 40 µm : 0,6 % 40 µm – 32 µm : 0,4 % Fond : 0 %.</p>	L'échantillon présente une faible propension à l'abrasion.

Essai (Référentiel)	Échantillon Réf. CRISTAL-UNION « Luzerne » - référence Ineris 23AM101	Observation / Commentaire / Interprétation / Conclusion
ATD/ATG (ASTM E 2550)	<ul style="list-style-type: none"> - Une perte de masse relative égale à 70 % environ entre la Température ambiante et 350°C puis une perte de masse relative égale à 20 % environ entre 350°C et 780°C. Perte de masse de 90 % à la fin de l'essai ; - Un pic endothermique entre la température ambiante et 280°C associée à une perte de masse de 10 % (perte de l'humidité de l'échantillon) ; - Un pic exothermique initié à environ 290°C et s'étalant jusqu'à environ 770°C. La température du témoin pour laquelle l'écart de température entre l'échantillon et le témoin dépasse 50°C est de 316°C. La température maximale atteinte par l'échantillon lors de ce phénomène est de 150°C environ. La perte de masse correspondant à cette exothermie est égale à 80 % environ ; - A 770°C, la perte de masse de l'échantillon est de 90 %. 	<p>Cet échantillon est combustible et possède une réactivité moyenne vis-à-vis de l'oxy-réactivité.</p> <p>Si le produit est stocké à haute température ou conditionné dans des stockages de grande taille, l'essai doit être complété par un essai d'auto-échauffement visant à déterminer le domaine de la taille critique en fonction de la température à partir duquel un risque d'auto-inflammation existe.</p>
Essais d'auto-échauffement en étuves isothermes (norme NF EN 15188 : 2020)	Températures critiques expérimentales : <ul style="list-style-type: none"> • Cube de 125 cm³ : 174 - 172°C ; • Cube de 214 cm³ : 167 - 165°C ; • Cube de 616 cm³ : 160 - 157°C ; • Cube de 1 000 cm³ : 152 - 150°C. 	<p>L'échantillon Réf. CRISTAL-UNION « Luzerne » - référence Ineris 23AM101 est considéré comme moyennement réactif au phénomène d'auto-échauffement :</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ Un stockage de cet échantillon d'une hauteur de 60 m a une température critique d'auto-échauffement de 20°C ; ○ Un stockage de cet échantillon d'une hauteur de 20 m a une température critique d'auto-échauffement de 40°C ; ○ Un stockage de cet échantillon d'une hauteur de 10 m a une température critique d'auto-échauffement de 50°C ; ○ Un stockage de cet échantillon d'une hauteur de 6 m a une température critique d'auto-échauffement de 60°C ; ○ Un stockage de cet échantillon d'une hauteur de 3 m a une température critique d'auto-échauffement de 70°C ; ○ Un stockage de cet échantillon d'une hauteur de 2 m a une température critique d'auto-échauffement de 80°C.

Essai (Référentiel)	Échantillon Réf. CRISTAL-UNION « Luzerne » - référence Ineris 23AM101	Observation / Commentaire / Interprétation / Conclusion
<p>Essai en four tubulaire de 150°C à 400°C sous balayage d'air sur un échantillon de luzerne.</p> <p>Essai en four tubulaire et dosage des gaz en ligne par µGC/TCD</p>	<p>L'essai a été réalisé entre 149 °C et 412 °C avec une montée régulière en température à 1,15 °C/min pendant 3h50.</p> <p>Prise d'essai de 3,12 g et masse résiduelle après essais de 0,28 g.</p> <p>Perte de masse : 91%.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Composition des gaz de pyrolyse pour une plage de 150°C – 300°C : <ul style="list-style-type: none"> ▪ H₂ : 0,002 mg/g ; ▪ CO₂ : 332 mg/g ; ▪ CH₄ : 1,03 mg/g ; ▪ CO : 40,9 mg/g ; ▪ Ethane : 0,07 mg/g ; ▪ Propane : 0,19 mg/g ; ▪ n-Hexane : 0,55 mg/g. - Composition des gaz de pyrolyse pour une plage de 300°C – 400°C : <ul style="list-style-type: none"> ▪ H₂ : 0,97 mg/g ; ▪ CO₂ : 691 mg/g ; ▪ CH₄ : 29,8 mg/g ; ▪ CO : 33,5 mg/g ; ▪ Ethane : 2,43 mg/g ; ▪ Propane : 1,71 mg/g ; ▪ n-Hexane : 0,18 mg/g. 	<p>Les analyses ont montré deux pics d'émissions :</p> <ul style="list-style-type: none"> - le premier entre 150°C et 300°C avec un maximum aux alentours de 220°C ; - le deuxième entre 300°C et 400°C avec un maximum aux alentours de 320°C. <p>Les résultats correspondent, pour chaque plage de température, à la somme des quantités mesurées rapportée à la prise d'essai.</p> <p>D'autres composés organiques ont été détectés (pics présents entre l'éthane et le n-butane), mais n'ont pas pu être identifiés.</p> <p>A noter que la décomposition de luzerne par pyrolyse (notamment par un processus d'auto-inflammation (150°C – 400°C), les principaux gaz de décomposition sont en majorité le CO₂ et CO et de deuxième ordre du méthane, puis des composés minoritaires (Ethane, Propane, n Butane, H₂).</p> <p>Ces résultats menés par l'Ineris sont cohérents avec les travaux de Boateng (Pyrolysis of energy crops including alfalfa stems, redd canarygrass, and eastern gamagrass. A. A. Boateng et al. Fuel 85 (2006) 2450-2457)¹ qui montrent que les gaz de décomposition dégagés par des cultures énergétiques, y compris les tiges de luzerne, l'alpiste rouge et le gamagrass de l'Est sont majoritairement le CO₂, CO, puis des hydrocarbures (CH₄, Ethane, Propane, n-Butane).</p>

Tableau 1 : Récapitulatif des résultats d'essais réalisés sur l'échantillon Réf. CRISTAL-UNION « Luzerne » - référence Ineris 23AM101

¹ <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236106001578>

3.2 Reconstitution du mécanisme accidentel dans la cellule

Ce chapitre apporte les éléments de réponse à la question n°2 de la saisine du BEA-RI relative à la reconstitution du mécanisme accidentel dans la cellule, et en particulier :

- Examiner les hypothèses d'une inflammation de poussières ou de gaz ;
- Déterminer la cohérence entre l'inflammation en fond de cellule et les observations constatées (jet de poussière, rupture dalle béton, puis explosion secondaire horizontale en tête),
- Déterminer globalement l'énergie d'explosion produite et évaluation des quantités de poussière ou de gaz de pyrolyse mises en jeu ;

Ce chapitre apporte aussi un élément de réponse à la question complémentaire du BEA-RI en date du 23 juin 2023 relative au dimensionnement de la dalle fragilisée faisant office de surface soufflable.

3.2.1 Examen et discrimination entre les hypothèses d'une inflammation de poussière de luzerne et d'une inflammation de gaz de pyrolyse

Le chapitre suivant vise, au travers une analyse de la réactivité des nuages inflammables supposées, à discriminer entre deux hypothèses d'explosion : explosion de gaz de pyrolyse ou explosion de poussière de luzerne.

3.2.1.1 Hypothèses sur la composition du gaz de pyrolyse de la luzerne

L'Ineris a réalisé des essais en four tubulaire sur l'échantillon CRISTAL-UNION « Luzerne » (référence Ineris 23AM101) qui permettent de déterminer la composition des gaz de pyrolyse. Les compositions massiques affichées dans le Tableau 1 sont normalisées et converties en compositions molaires. Les valeurs obtenues sont indiquées dans le Tableau 2 ci-dessous, et comparées aux deux compositions déterminées par Boateng et al.²,

	Plage de température de test	Composition molaire des gaz (% v/v)			
		CO ₂	CO	Total Hydrocarbures	H ₂
Echantillon CRISTAL UNION	150-300°C	83	16	1	0
	300-400°C	81	6	10	3
Mélange 1 (Boateng)		60	20	20	-
Mélange 2 (Boateng)		80	5	15	-

Tableau 2 : Compositions molaires des échantillons CRISTAL UNION comparées aux résultats de Boateng et al.

Ces gaz sont émis à plusieurs centaines de degrés Celsius. En cas de mélange de ces gaz avec l'air ambiant du silo, un mélange inflammable peut être obtenu. Pour un mélange constitué de manière adiabatique, une température de plusieurs centaines de degrés, inférieure à la température d'émission des gaz de pyrolyse, peut être attendue. Des phénomènes de pertes thermiques au niveau des parois contribuent à faire chuter cette température.

² A.A. Boateng et al. (2006) Pyrolysis of energy crops including alfafa stems, reed canarygrass an eastern gamagrass. Fuel 85

Il est difficile de quantifier théoriquement la température finale du mélange inflammable. Rappelons tout de même que la température d'ambiance du silo mesurée avant explosion est de l'ordre de 40°C. Il paraît raisonnable de se baser sur cette valeur pour les calculs à suivre.

Avec l'outil open-source CANTERA, on peut calculer certaines propriétés fondamentales de combustion de ces mélanges dans l'air. On suppose pour ces calculs que les mélanges sont en proportions stœchiométriques afin de maximiser les effets de l'explosion. On suppose également que les mélanges inflammables sont à pression atmosphérique et à 20°C avant inflammation.

	Plage de température de test	Pression finale adiabatique à volume constant (bar)	Vitesse de flamme laminaire (cm/s)	Taux d'expansion thermique (-)
Echantillon CRISTAL UNION	150-300°C	4,3	0,2	3,7
	300-400°C	5,8	1,5	4,9
Mélange 1 (Boateng)		8,0	18	6,6
Mélange 2 (Boateng)		7,01	4	5,8

Tableau 2 : Propriétés explosives des échantillons CRISTAL UNION comparées aux résultats de Boateng et al.

Il apparaît que les gaz de pyrolyse émis par les échantillons CRISTAL UNION sont très peu réactifs en raison de la proportion très importante de gaz inerte (plus de 80% de CO₂) si l'on en juge par la vitesse de flamme calculée.

Si l'on admet que l'essai en four tubulaire est représentatif du phénomène d'auto-échauffement dans le silo, alors l'hypothèse d'une explosion de gaz de pyrolyse dans le silo, sans contribution de la poussière de luzerne, paraît très improbable, compte tenu de la très faible réactivité de ces gaz.

3.2.1.2 Hypothèses de modélisation de la réactivité des poussières

G.E.A. Andrews a obtenu les données suivantes pour caractériser la réactivité des poussières via des essais en tube de Hartmann.

Matériau	d(0.5)	Concentration Injectée (g/m ³)	Pmax/Pi	Kst (bar.m/s)	Masse brûlée (%)	Conc. corrigée (g/m ³)	Richesse équivalente	Vitesse de flamme turbulente St (m/s)	Vitesse de flamme laminaire Sl (m/s)
Coquilles de pistaches	55,37	739	9,29	81,8	63,4	469	2,41	3,69	0,1
Coquilles de pignons de pin	46,88	742	8,9	61,3	58,4	433	2,62	3,87	0,11
Lait en poudre	92,49	687	8,73	70,8	49,6	342	2,14	6,45	0,18
Farine à biscuit	16,14	728	9,4	143	81,6	594	2,25	10,14	0,27
Farine de maïs	14,05	741	9,2	157,1	73,9	547	2,58	12,09	0,33
Noix	44,96	745	9,38	97,7	66,2	493	2,77	4,1	0,14
Charbon Kellingley	51,86	738	7,87	74,8	38,1	281	2,23	1,24	0,04

Tableau 3 : Caractéristiques de réactivité de combustion de poussières combustibles³

Le paramètre K_{st} est d'une valeur moyenne de 110 bar.m/s pour des fines de luzerne⁴. D'après le tableau ci-dessus, par analogie avec d'autres poussières d'origine agricole, une vitesse de flamme laminaire de l'ordre de 15 cm/s peut être retenue pour caractériser la réactivité de la luzerne. Cette valeur est plus de 10 fois supérieure à la vitesse de flamme des gaz de pyrolyse si l'on se base sur les essais réalisés en four tubulaire sur les échantillons CRISTAL UNION.

3.2.1.3 Synthèse

L'hypothèse d'une explosion d'un grand volume inflammable composé uniquement de gaz de pyrolyse mélangés à l'air paraît peu crédible, étant donné la faible réactivité constatée pour ce mélange. La possibilité qu'une inflammation d'un mélange gaz de pyrolyse / air déclenche une explosion de poussière est possible. Mais il est aussi possible que la mise en suspension de la poussière soit due au débâtissage de la luzerne, et non à une explosion des gaz de pyrolyse. Dans ce cas, le débâtissage aurait mis en contact la poussière de luzerne avec des particules rendues incandescentes par un phénomène d'auto-échauffement en cours.

Dans la suite, on conserve l'hypothèse que les effets de pression dans le silo sont essentiellement expliqués par une explosion de poussière occupant tout ou partie du volume intérieur du silo.

³ CISAP6 Paper 56 Bologna, Italy, April 14-16, 2014.

H. Sattar et al. (2014) Turbulent flame speeds and laminar burning velocities using the ISO 1 m³ dust explosion method. Chemical Engineering Transactions 36

⁴ Valeur moyenne issue de la base de données expérimentale de l'Ineris

3.2.2 Détermination de la cohérence entre l'inflammation en fond de cellule et les observations constatées

Afin de déterminer la cohérence entre l'inflammation en fond de cellule et les observations constatées, l'Ineris a, dans un premier temps, analysé l'enregistrement des caméras de surveillance des sites voisins. Puis, dans un second temps, au regard des dégâts observés, l'Institut a estimé les pressions de rupture de différents éléments constitutifs de la cellule et comparé ces valeurs aux résultats de modélisations d'explosion primaire en cellule C20.

3.2.2.1 Enregistrements des caméras de surveillance de sites industriels voisins

Les images ci-dessous, transmises par le BEA-RI, sont tirées d'une caméra de surveillance d'un site industriel voisin.



Figure 6 : Photos de l'accident prises par une caméra de surveillance d'un site industriel voisin, à quelques instants d'intervalle [photo transmise par le BEA-RI]

Des poussières sont émises au sommet du silo sous forme de jet d'abord verticalement puis horizontalement. Cette séquence dure quelques secondes. Aucune flamme n'est visible sur le film. **Ces éléments mettent en avant une absence d'explosion secondaire.**

3.2.2.2 Estimation de la pression de rupture de divers éléments

L'objectif dans ce paragraphe est de déterminer le degré de confinement de l'explosion en estimant la pression de rupture à l'explosion de divers éléments endommagés ou non dans la cellule accidentée C20. La rupture des éléments est évaluée sur la base des plans et photographies transmis à l'Ineris.

Les principes généraux de tenue aux explosions sont issus du référentiel Ineris⁵ de calcul aux actions accidentelles. Étant données les nombreuses incertitudes résiduelles, l'Ineris retient le principe suivant pour l'analyse :

- Des pressions minimales sont retenues pour les composants totalement endommagés ;
- Une fourchette de pression est retenue pour les éléments ayant subi des déformations plastiques ;
- Des pressions maximales sont retenues pour les composants n'ayant pas subi de déformation.

On considère des matériaux classiques pour l'acier et le béton. Il est important de noter que le comportement dynamique n'est pas considéré ici et qu'il peut influencer les niveaux de pression retenus. En effet, on considère que le comportement des éléments est quasi-statique, ce qui est équivalent à considérer une montée en pression lente et un temps d'application de la surpression long par rapport à la fréquence de vibration des éléments retenus.

5 INERIS, La résistance des structures aux actions accidentelles, 2002 (disponible sur www.ineris.fr)

3.2.2.2.1 Description détaillée du silo de stockage

Afin de déterminer la pression de rupture à l'explosion de divers éléments endommagés ou non dans la cellule C20, l'Ineris a, tout d'abord, caractérisé de manière détaillée (dimensions et matériaux), sur la base des documents qui lui ont été transmis, le silo et ses éléments constitutifs jugés pertinents.

Pour rappel, le silo accidenté est un silo de stockage en béton armé de 50 m de long (incluant la tour de manutention) et 25 m de large, composé de 15 cellules cylindriques verticales avec base conique disposées en 5 rangées de 3 cellules et de 8 as de carreau. Chaque cellule mesure 40 m de haut (dont 4 m pour la base conique), avec un diamètre de 8 m et une épaisseur de paroi de 17 cm.

Concernant le plancher sur cellules et as de carreau du silo, il est composé de dalles en béton armé de 14 cm d'épaisseur, reposant sur des poutres en béton armé et sur les parois des cellules, tel qu'indiqué Figure 7. Notons la présence de deux poutres, référencées N754 et N755, reliant, respectivement, la cellule C20 à la C21 et la C20 à la C19.

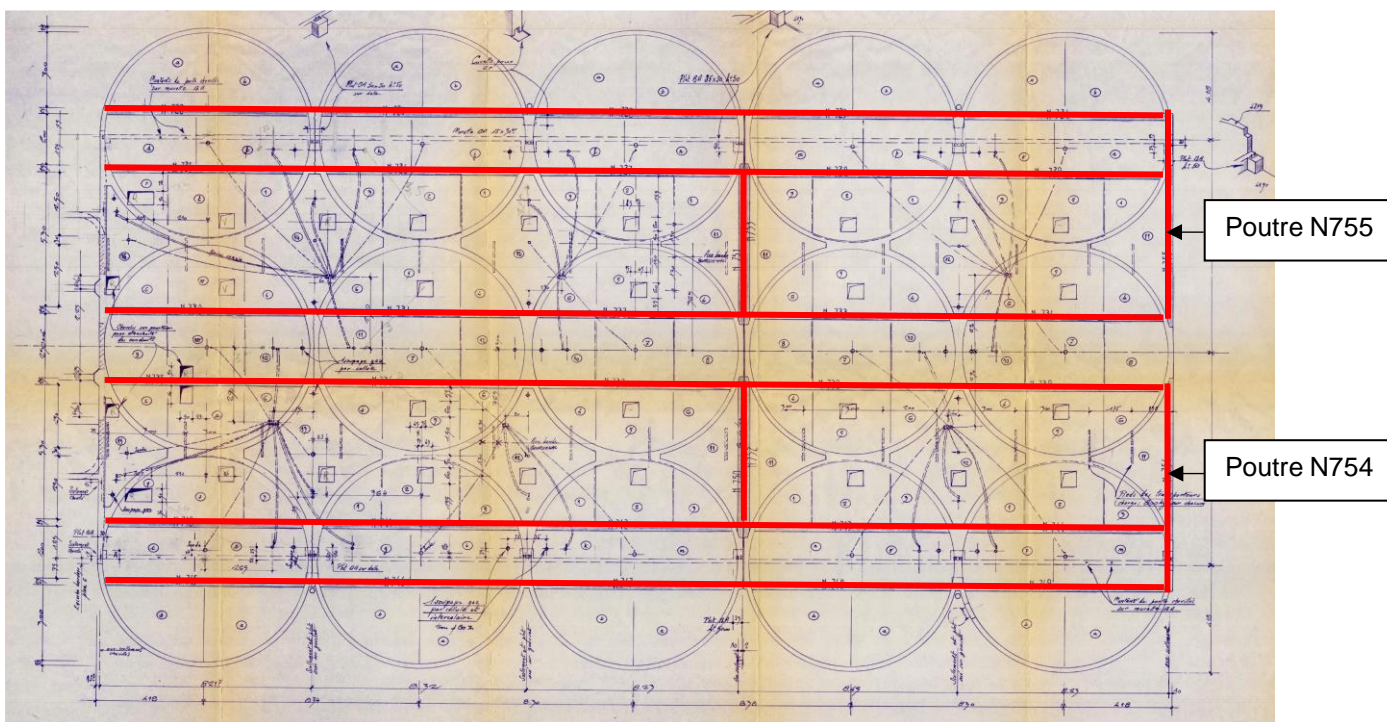


Figure 7 : Disposition des poutres en béton armé (en rouge) sur lesquelles reposent les dalles du plancher sur cellules

Le plancher sur chaque cellule se compose de plusieurs dalles dont l'une est fragilisée afin de faire office de surface soufflable visant à garantir l'intégrité du reste de la structure en cas d'explosion.

La dalle fragilisée faisant office de surface soufflable de la cellule C20 accidentée est située au centre du plancher sur cellule, comme indiqué Figure 8. En l'absence de plus de détails, il est impossible de savoir avec certitude si cette dalle est simplement posée ou fixée sur 2 ou 4 côtés aux autres dalles du plancher. Les deux hypothèses seront considérées dans la suite de ce rapport.

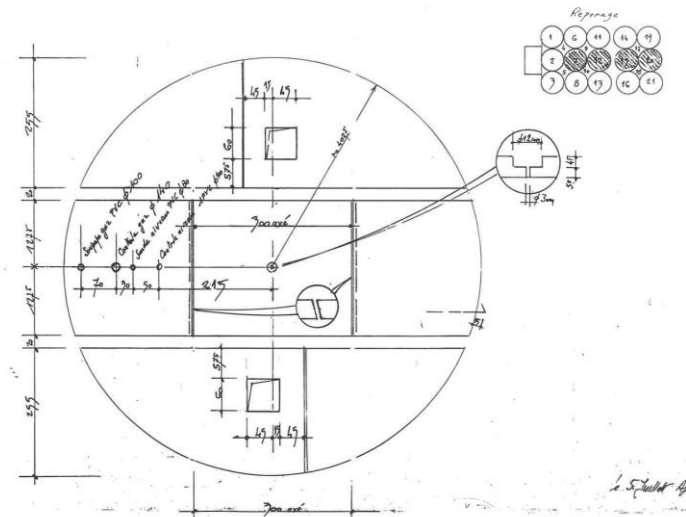


Figure 8 : Disposition des dalles de la cellule C20 accidentée, avec la dalle fragilisée faisant office de surface soufflable au centre

Il convient de noter que les dispositions des dalles sur cellules indiquées Figure 7 et Figure 8 ne sont pas les mêmes. Après analyse des photographies transmises à l'Ineris et en prenant en compte les dates de réalisation des plans, l'Institut considère pour la suite de l'analyse le plan de Figure 8, plus récent (en date du 13 juillet 1989, contre 4 juillet 1989 pour le plan Figure 7).

3.2.2.2.2 Description des principaux dégâts du silo

Conformément au principe retenu par l'Ineris pour réaliser l'analyse de la pression de rupture de divers éléments, une analyse des dégâts a été menée sur la base des photographies et documents transmis afin de déterminer les composants totalement endommagés, ceux ayant subi des déformations plastiques et, enfin, ceux n'ayant pas subi de déformation.

Pour rappel, d'après les différentes informations (notamment photographiques) transmises par le BEA-RI à l'Ineris, les dégâts relevés se situent en partie haute du silo, au niveau du plancher et de la galerie sur cellules. La tour de manutention, le fût des différentes cellules et la partie basse du silo, au niveau de la galerie sous cellules, ne sembleraient pas présenter de dégâts visuels particuliers.

Les photographies post-accidentelles prises après retrait des éléments de bardages de la galerie sur cellules ont montré que le plancher sur la cellule accidentée C20 et sur les cellules C19 et C21 voisines présentait des dégâts importants avec de nombreuses fissurations et ruptures. Les éléments de dalles semblent s'être soulevés et être retombés sur place. Les lignes de fissuration du plancher sur cellules supposées par l'Ineris après analyse des documents lui ayant été transmis sont représentées sur la Figure 10 ci-dessous. Les poutres N754 et N755, sur lesquelles reposent ces éléments de plancher, se sont rompues au niveau de leurs liaisons avec les cellules C19, C20 et C21. À noter qu'il ne semble pas y avoir eu de projection des dalles de toiture.



Figure 9 : Prise de vue du sommet du silo après l'accident du 6 janvier 2023 et le retrait des éléments de bardages de la galerie sur cellules

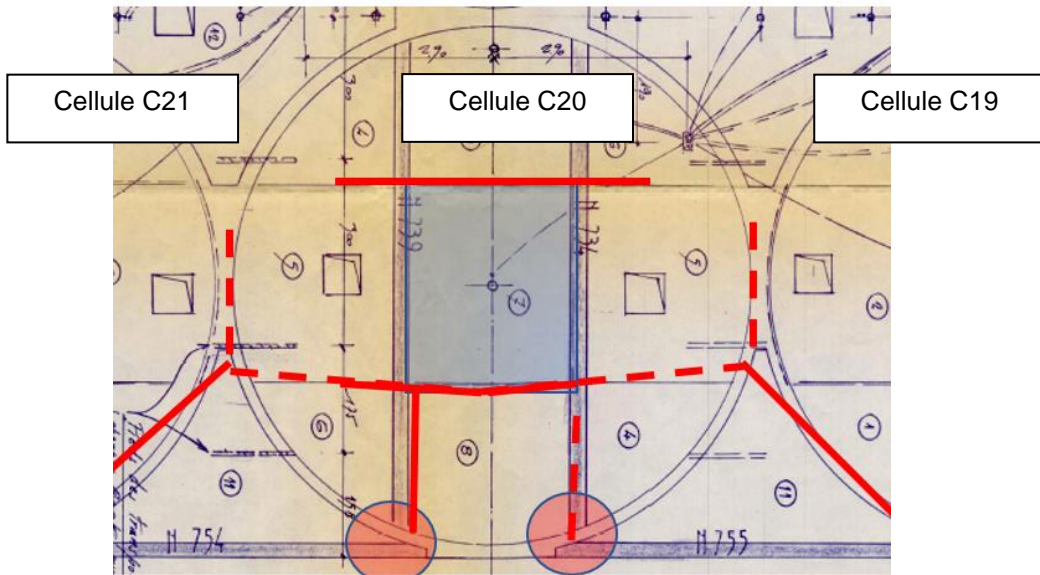


Figure 10 : Lignes de fissuration du plancher sur la cellule C20 – Lignes rouges : les lignes de fissurations supposées par l'Ineris ; rectangle bleu : positionnement de la dalle fragilisée faisant office de surface soufflable ; rond rouge : point de rupture des poutres N754 et N755 (liaison entre les poutres et la cellule C20)

3.2.2.2.3 Estimation des pressions de rupture de divers éléments constitutifs du silo

Sur la base des analyses présentées ci-dessus, l'Ineris a évalué la pression de rupture à l'explosion de différents éléments constitutifs jugés pertinents du silo. Ces estimations sont présentées au Tableau 4.

Élément		Dimensions (mm)	Pression de rupture estimée	Information sur la pression appliquée
Fût en béton armé de la cellule (pas de dégâts constatés)		36 000 en hauteur x 8 000 en diamètre x 170 en épaisseur	1 bar	Inférieure à 1 bar
Dalle n°7 dite « fragilisée » (rupture de la dalle)	Hypothèse : dalle supposée simplement posée	3 000 x 2 550 x 140	35 mbar	Supérieure à 35 mbar
	Hypothèse : dalle supposée fixée sur 2 ou 4 côtés		Entre 100 et 250 mbar	Supérieure à 100 mbar
Dalles dites « non fragilisées » ayant rompu (rupture des dalles) – (autres dalles)		2525 en largeur x 140	Entre 100 et 250 mbar	Supérieure à 100 mbar

Tableau 4 : Niveaux de surpression estimés pour certains éléments de la cellule C20

3.2.2.3 Modélisation d'une explosion primaire en cellule C20 avec inflammation du fond de cellule

Suite à une demande du BEA-RI en date du 23 juin 2023, l'Ineris a, tout d'abord, étudié si, en cas d'explosion primaire en cellule C20, la dalle dite « fragilisée » du plancher de la cellule, considérée comme seule surface soufflable, était dimensionnée afin de garantir l'intégrité structurelle du reste de la cellule (fût en béton armé et dalles « non fragilisée »).

L'Ineris a, ensuite, mené une analyse afin d'étudier si une explosion primaire en cellule C20 avec inflammation en fond de cellule était cohérente avec les dégâts observés.

3.2.2.3.1 Modélisation d'une explosion primaire en cellule C20 avec comme seule surface soufflable la dalle fragilisée

Un premier calcul a été réalisé à l'aide du logiciel EFFEX (présenté en annexe 4) afin d'évaluer si, en cas d'explosion primaire en cellule C20, la dalle dite « fragilisée » était correctement dimensionnée afin de garantir l'intégrité structurelle du reste de la cellule (fût en béton armé et dalles « non fragilisée »).

Pour ce faire, l'Ineris a évalué la pression résiduelle dans ce volume en considérant, comme seule surface soufflable, la dalle fragilisée. Cette valeur a ensuite été comparée avec les ordres de grandeurs de pressions de rupture des autres dalles du plancher présentées dans le Tableau 4.

Les caractéristiques bâtementaires considérées dans la modélisation sont les suivantes :

Localisation	Dimensions	Matériaux
Fût en béton armé de la cellule	Hauteur : 36 m / Diamètre : 8 m	Béton armé
Dalle n°7 dite « fragilisée »	Longueur : 3 m / Largeur : 2,55 m Épaisseur : 0,14 m	Béton armé Surface : 7,50 m ² / Périmètre : 11 m
Dalles dites « non fragilisées »	Largeur : 2,525 m / Épaisseur : 0,14 m	Béton armé
Surface ouverte permanent	Surface : 0,75 m ²	-

Tableau 5 : Caractéristiques bâtementaires de la cellule C20

Deux hypothèses ont été considérées et étudiées pour la pression de rupture des dalles « fragilisées » dont la masse surfacique a été estimée à 350 kg/m³ :

- Cas dalle fragilisée simplement posée : 35 mbar ;
- Cas dalle fragilisée fixée sur 2 ou 4 côtés : entre 100 et 250 mbar.

Considérant une inflammation en fond de cellule, les hypothèses complémentaires suivantes ont, par ailleurs, été considérées :

- Longueur de propagation de flamme : 40 m ;
- Taux d'expansion thermique : 5 ;
- Vitesse de flamme turbulente : 2 m/s.

À noter que les valeurs de taux d'expansion thermique et de vitesse de flamme dépendent des caractéristiques de l'atmosphère inflammable à l'origine de l'explosion. Dans le cas de l'accident du 6 janvier 2023, et comme détaillé au chapitre 3.2.1, on retient l'hypothèse que c'est une explosion de poussière qui génère les effets de pression observés. Rappelons qu'il n'est pas exclu que la mise en suspension des poussières, prérequis nécessaire à leur explosion, puisse provenir d'une explosion de gaz de pyrolyse.

Les profils temporels de pression calculés dans la cellule sont les suivants.

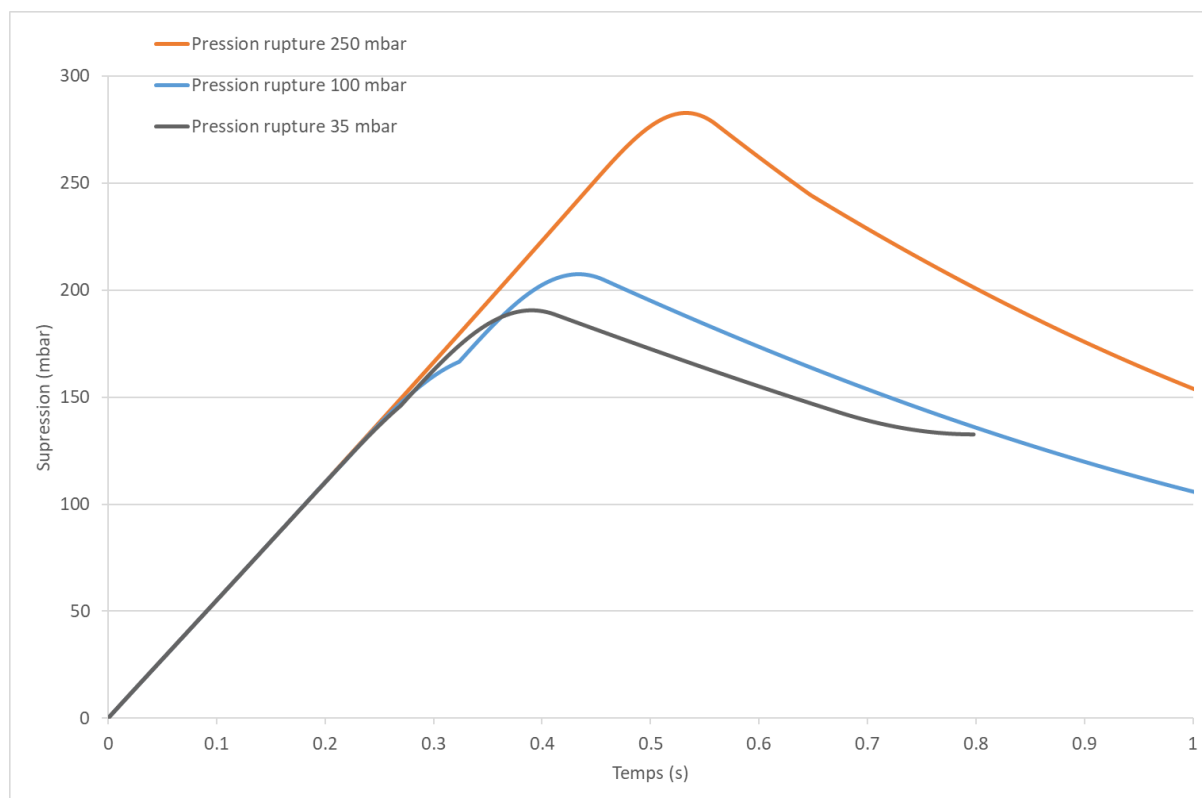


Figure 11 : Profils temporels de pression résiduelle dans le volume de la cellule pour une explosion primaire en ne considérant que la rupture de la dalle fragilisée

D'après la Figure 11, les pressions résiduelles obtenues dans le volume de la cellule sont les suivantes :

- Hypothèse dalle fragilisée simplement posée (pression d'ouverture fixée à 35 mbar) : pression résiduelle dans la cellule de l'ordre de 200 mbar ;
- Hypothèse dalle fragilisée fixée sur 2 ou 4 côtés (pression d'ouverture comprise entre 100 et 250 mbar) : pression résiduelle comprise entre 210 mbar et 285 mbar.

Les valeurs de pressions résiduelles obtenues pour les différentes hypothèses en termes de pressions d'ouverture de la dalle fragilisée sont donc du même ordre de grandeur. Elles s'avèrent, par ailleurs, du même ordre de grandeur que les valeurs de tenue des dalles non fragilisées présentées dans le Tableau 4.

Ainsi, si le dimensionnement de la dalle soufflable a permis d'éviter la rupture de la paroi verticale de la cellule lors d'une explosion interne, il semble, à lui seul, insuffisant pour empêcher la rupture des autres dalles.

3.2.2.3.2 Modélisation d'une explosion primaire en cellule C20 : cohérence entre une inflammation en fond de cellule et les dégâts observés

Une modélisation d'explosion primaire en cellule C20 a été réalisée à l'aide du logiciel EFFEX, les valeurs de pressions résiduelles obtenues étant, ensuite, comparées aux valeurs de pression de rupture estimées présentées dans le Tableau 4.

Les caractéristiques bâtementaires considérées dans la modélisation sont les suivantes :

Localisation	Dimensions	Matériaux	Prupt ⁶	Masse surfacique kg/m ²
Fût en béton armé de la cellule C20	Hauteur : 36 m Diamètre : 8 m	Béton armé	> 1 bar	-
Dalle n°7 dite « fragilisée »	Longueur : 3 m Largeur : 2,55 m Épaisseur : 0,14 m	Béton armé : Surface : 7,50 m ² Périmètre : 11 m	Entre 100 et 250 mbar	350
Dalles dites « non fragilisées »	Largeur : 2,525 m Épaisseur : 0,14 m	Béton armé : Surface : 20 m ² Périmètre : 39 m	Entre 100 et 250 mbar	350
Surface ouverte permanent	Surface : 0,75 m ²	-	-	-

Tableau 6 : Caractéristiques bâtementaires de la cellule C20, en considérant la rupture des dalles non fragilisées

L'ensemble des parois sont considérées dans cette modélisation comme potentiellement soufflables avec, comme pression de rupture, les pressions rappelées dans le tableau ci-dessus.

Considérant une inflammation en fond de cellule, les hypothèses complémentaires suivantes ont, par ailleurs, été considérées :

- Longueur de propagation de flamme : 40 m ;
- Taux d'expansion thermique : 5 ;
- Vitesse de flamme turbulente : 2 m/s.

Les valeurs de taux d'expansion thermique et de vitesse de flamme dépendent des caractéristiques de l'atmosphère inflammable à l'origine de l'explosion. Dans le cas de l'accident du 6 janvier 2023, et comme détaillé au chapitre 3.2.1, on retient l'hypothèse que c'est une explosion de poussière qui génère les effets de pression observés. Rappelons qu'il n'est pas exclu que la mise en suspension des poussières, prérequis nécessaire à leur explosion, puisse provenir d'une explosion de gaz de pyrolyse.

Les profils temporels de pression calculés dans la cellule sont les suivants.

⁶ Valeurs issues du Tableau 4

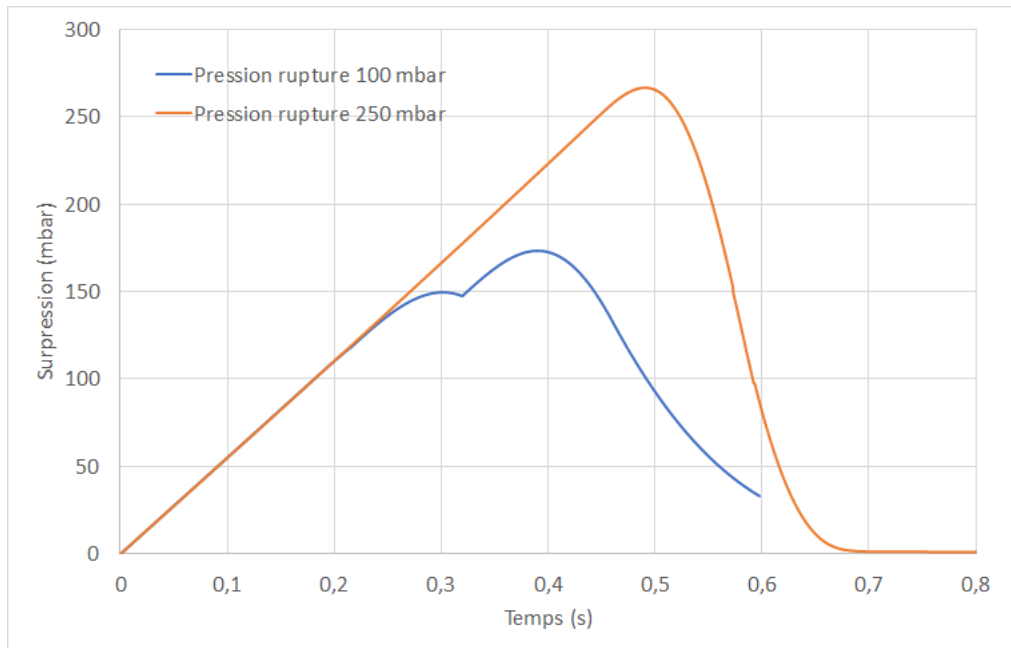


Figure 12 : Profils temporels de pression résiduelle dans le volume de la cellule pour une explosion primaire en considérant une rupture des mêmes dalles que lors de l'accident

D'après la Figure 12, les pressions résiduelles obtenues dans le volume de la cellule sont de l'ordre de 170 mbar à 260 mbar. Ces pressions sont supérieures aux pressions de tenue de la dalle fragilisée et des autres dalles ayant rompu lors de l'accident du 6 janvier 2023, et dont les valeurs sont présentées dans le Tableau 4, tout en restant du même ordre de grandeur. Elles restent, par ailleurs, inférieures à la pression de tenue du fût en béton armé de la cellule.

Ces modélisations indiquent qu'une explosion primaire en cellule C20 est cohérente avec les dégâts observés. Par ailleurs, bien qu'il soit difficile de déterminer le lieu de l'inflammation au sein de la cellule, elles montrent également qu'il n'y a pas de contradiction entre un scénario d'inflammation en fond de cellule et les dégâts constatés.

Remarque : les valeurs indiquées ci-dessus (de pression de rupture, de pression résiduelle dans le volume suite à l'explosion, etc.) sont à considérer comme des ordres de grandeur et se présentent comme tels. En effet, les plans étant incomplets ou, parfois, contradictoires, nous avons dû émettre des hypothèses concernant les caractéristiques des différentes dalles de la cellule (sur les ferraillements, sur certaines dimensions, etc.).

3.2.2.3.3 Conclusion des différentes modélisations effectuées

Les différentes modélisations réalisées indiquent :

- **Que la dalle fragilisée était insuffisamment dimensionnée pour empêcher la rupture des dalles non fragilisée en cas d'explosion primaire dans la cellule ;**
- **Qu'une explosion primaire en cellule C20 est cohérente avec les dégâts observés et, bien qu'il soit difficile de déterminer le lieu de l'inflammation au sein de la cellule, qu'il n'y a pas de contradiction entre un scénario d'inflammation en fond de cellule et les dégâts constatés.**

3.2.3 Détermination globale de l'énergie d'explosion produite et de la quantité de poussière mise en jeu

L'énergie de l'explosion peut être estimée sur la base des calculs EFFEX menés en partie précédente, dans le paragraphe 3.2.2.3.2. Pour parvenir à la pression maximale d'explosion, il est nécessaire de brûler une masse d'atmosphère inflammable minimale de l'ordre de 200 kg. L'énergie de combustion peut être estimée par l'expression suivante, tirée du rapport Omega sur les explosions de poussières⁷ :

$$dH_{comb} = c_p T_0 (\tau - 1)$$

En assimilant le mélange inflammable à de l'air, on a $c_p=1004$ J/kg/K. Pour $T_0 = 300K$ et $\tau = 5$, on obtient $dH_{comb}=1,2$ MJ/kg. **Ainsi, l'énergie globale d'explosion conduisant au niveau de pression résiduelle évaluée précédemment dans la cellule C20 et associée au niveau de dégâts constatés est au minimum de l'ordre de 240 MJ.**

En faisant l'hypothèse d'une concentration de poussière de $0,5$ kg/m³, ce qui représente le maximum de réactivité pour des poussières d'origine agricole et peu denses comme la luzerne, cette énergie mise en jeu correspond à environ 60 kg de poussière en suspension, ce qui est très peu par rapport à la taille du silo (seulement 6 % du volume du silo). Toutefois il s'agit d'une valeur minimale, la quantité de poussière mise en jeu dans l'explosion pourrait être beaucoup plus élevée.

Le fait qu'il n'y ait aucune flamme visible à l'extérieur, alors que l'inflammation s'est vraisemblablement produite au fond du silo donc loin des événements, suggère que l'atmosphère explosive ne remplissait pas la totalité du silo. A titre indicatif, une atmosphère explosive remplissant la moitié du silo correspondrait à 500 kg de poussière en suspension, soit un dépôt de poussière de l'ordre de 1 mm uniformément réparti sur la paroi du silo⁸. Donc, même s'il est difficile de déterminer précisément la quantité de poussière impliquée dans l'explosion, on peut conclure qu'une quantité assez faible, de l'ordre de quelques dizaines de kg, était suffisante pour produire les effets observés, mais que la quantité réellement présente était certainement largement plus importante.

⁷ C. Proust (2006) Rapport Omega 21 : Explosion de poussières. Phénoménologie et modélisation des effets. Téléchargeable sur www.ineris.fr

⁸ Hypothèse de calcul : surface interne du silo 1000 m³, densité de la luzerne en poudre non compactée 500 kg/m³.

3.4 Revue des recommandations inspirées de l'expérience des céréaliers sur la gestion de l'auto-échauffement et la prévention des effets de voûte et de bâtissage sur les parois

Ce chapitre apporte les éléments de réponse à la question n°3 de la saisine du BEA-RI relative à la revue des recommandations inspirées de l'expérience des céréaliers sur la gestion d'auto-échauffement et la prévention des effets de voûte et de bâtissage sur les parois.

Après des sollicitations et contacts auprès des céréaliers et pré-information auprès du BEA-RI, l'Ineris n'a pas reçu de confirmation de rendez-vous de la profession pour échanger sur ses bonnes pratiques de la gestion d'auto-échauffement et la prévention des effets de voûte et de bâtissage sur les parois. Ainsi, l'Ineris a exprimé auprès du BEA-RI ne pas avoir pu collecter des informations pour pouvoir répondre spécifiquement sur la prévention des effets de voûte et de bâtissage sur les parois, ce qui a été accepté par le BEA-RI.

3.4.1 Retour d'expérience et phénomènes dangereux associés aux installations de mise en œuvre de luzerne

Depuis de nombreuses années, les activités de culture et de production animales⁹ représentent près de 10 % de l'accidentologie française des ICPE recensée par le BARPI.

Entre 2009 et 2021, l'étude de 1 259 événements des secteurs de la culture et production animale (hors sites agroalimentaires et méthanisation agricole) révèle deux phénomènes dangereux récurrents : l'incendie (85 % des événements) et les rejets de matières dangereuses et/ou polluantes (23,2 % des événements) ; et de façon moindres les explosions (3,6 % des événements) et autres typologies¹⁰ (5,9 % des événements). L'analyse des perturbations et causes profondes permet au BARPI d'en tirer des enseignements et de rappeler certaines bonnes pratiques.

⁹ [Accidentologie dans les activités de culture et production animale - La référence du retour d'expérience sur accidents technologiques \(developpement-durable.gouv.fr\)](https://developpement-durable.gouv.fr/)

¹⁰ Notamment des asphyxies d'animaux, des accidents de personnes, mortels ou avec blessures, des inondations.

L'interrogation de la base ARIA du BARPI sur l'accidentologie associée à la luzerne¹¹ recense 81 événements, notamment :

- Incendie d'installations de fabrication de pellets de luzerne,
- Incendie de stockage de balles de luzerne,
- Incendie suivi d'une explosion dans une installation de déshydratation de luzerne,
- Incendie silo de stockage de pellets de luzerne,
- Incendie dans un cyclone de séchage de balles de luzerne,
- Auto-échauffement puis Incendie d'un entrepôt de stockage de luzerne,
- Incendie au niveau d'un refroidisseur sur une ligne de granulation d'une usine de granulés de luzerne,
- Auto-échauffement puis incendie de granulés de luzerne stockés dans une cellule de silo,
- Etc.

La luzerne brute contient environ 15 à 20 % d'humidité, environ 30 % de cellulose, environ 30 % de protéine (M.A.T. : Matière Azotée Totale), environ 10 % de matières grasses et de vitamines et d'éléments minéraux et autres traces de constituants divers.

La luzerne déshydratée contient environ 10 % d'humidité, environ 30 % de cellulose, environ 30 % de protéine (M.A.T. : Matière Azotée Totale), environ 15 % de matières grasses et de vitamines et d'éléments minéraux et autres traces de constituants divers.

Le retour d'expérience met en évidence de nombreux départs de feu au niveau des stockages de luzerne. Ceux-ci proviennent notamment de phénomènes d'auto-échauffement de luzerne ou bien de l'introduction de particules incandescentes lors du séchage, provoquant une inflammation.

Le retour d'expérience (Incendie d'un silo de granulés de luzerne à Saint Ouen l'Aumône, février 1998) sur des feux dans des installations de stockage de produits agroalimentaires montre que les conséquences en termes de flux thermiques restent a priori limitées¹².

Les principaux constituants du panache de fumées d'incendie peu ventilé de stockage en silo de luzerne sont le CO, le CO₂, des COV et de la vapeur d'eau et possiblement de l'ammoniac dû à la décomposition thermique des matières azotées totales.

Les émanations gazeuses liées à la combustion incomplète peuvent être toxiques en champ proche (distance de l'ordre de 100 m), notamment à cause de la présence de concentrations de CO, de CO₂, des COV et en ammoniac dans le panache de fumées.

D'après les informations et le retour d'expérience identifié par l'Ineris sur la réactivité de la luzerne, le retour d'expérience de différentes installations de stockage, de fabrication, de séchage et de déshydratation de luzerne permet de présenter le constat suivant :

- Prise de conscience des professionnels que ces activités présentent un risque d'incendie et d'explosion,
- Recrudescence de l'accidentologie liée à l'incendie de stockage de luzerne notamment en période estivale où la température de l'air élevée peut activer la cinétique d'auto-échauffement.

¹¹ https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/?s=luzerne&fwp_recherche=luzerne&fwp_paged=2

¹² Connaître et faire face au risque aux risques des organismes stockeurs agricoles. Tome 1.
<https://www.calameo.com/read/005148363a294056c31ef>

Les installations de stockage de luzerne peuvent présenter des risques d'incendie et d'explosion :

- en marche normale,
- durant les phases transitoires de démarrage et d'arrêt,
- en période d'arrêt proprement dit,
- en cas de dysfonctionnement.

En ce qui concerne la réactivité de solides combustibles tels que la luzerne en phase de stockage, deux principaux phénomènes sont envisagés^{13, 14} :

- un phénomène d'explosion de poussière lors du chargement gravitaire ou pneumatique de silos de stockage,
- un phénomène d'auto-échauffement correspondant à une oxydation de la luzerne par l'oxygène de l'air (feu couvant à combustion lente) ou initialement activé par une activité de fermentation biologique par une teneur en humidité supérieure à 25 % de la luzerne :
 - o un feu qui couve peut se poursuivre pendant une longue période avant d'être détecté,
 - o la détection précoce nécessite une mesure fiable de la teneur en CO à des teneurs faibles (quelques centaines de ppm),
 - o la propagation du noyau de pyrolyse est lent et préférentiellement vers le bas du silo (possibilité d'entrée d'air via la vanne de vidange non étanche),
 - o la migration vers la partie supérieure des gaz de pyrolyse est lente.

Les incidents survenus depuis la mise en service des installations de stockage de luzerne concernent des aspects d'auto-échauffement.

Cela s'explique pour les raisons multiples suivantes :

- la luzerne est une substance combustible et est réactive à l'oxydation chimique. Les températures de la luzerne dans les silos de stockage peuvent dépasser les températures critiques d'auto-échauffement du fait des dimensions de stockage des silos de luzerne,
- des phénomènes de fermentation biologique (liée à un défaut qualité du produit par une teneur en humidité élevée ou une introduction accidentelle d'eau de pluie ou d'eau de lavage dans les silos) peuvent augmenter la température de la luzerne jusqu'à 75°C environ et passer le relais au phénomène d'auto-échauffement du produit et faciliter ainsi l'atteinte de sa température critique,
- le système de détection de CO dans les silos de stockage doit être suffisamment précoce pour détecter convenablement un phénomène d'auto-échauffement : de plus, les orifices de vidange des silos (vis planétaires, écluse rotative de vidange) doivent être étanches au passage de l'air afin de limiter les entrées d'air et ainsi limiter les démarrages d'auto-échauffement dans la partie inférieure des silos.

3.4.2 Revue des recommandations sur la gestion d'auto-échauffement.

Les techniques d'intervention relative aux installations de stockage de grains en cas d'explosion de poussières et d'incendie sont bien connues à la lumière du retour d'expérience et sont définies au § IV du guide de référence rédigé par les céréaliers¹⁵.

¹³ Méthodes pour l'évaluation et la prévention des risques incidentels (DRA 35 – rapport Omega11) Connaissance des phénomènes d'auto-échauffement des solides combustibles (N°Ref INERIS DRA – 2005 – 46055 Février 2005) : <http://www.ineris.fr/centredoc/omega11web.pdf>.

¹⁴ Safety aspects of solid biomass: Storage, transportation and feeding, Jaap Koppejan, IEA – Bioenergy Task 32.

¹⁵ Connaître et faire face au risque aux risques des organismes stockeurs agricoles. Les principaux éléments à appréhender en cas de situations accidentelles. Tome 2. <https://www.calameo.com/read/00632687737edc9d1e5e9>

La gestion de la prévention et de la protection du risque d'auto-échauffement avancé ou d'auto-inflammation des silos de stockage peut s'appuyer sur les principes suivants :

- Optimiser la mise en place de la surveillance de la concentration de la teneur en CO dans les ciels gazeux des silos de stockage et utiliser avec parcimonie le transilage ;
- Favoriser le suivi de la mesure de concentration de CO dans le ciel de chaque silo de stockage, ou par défaut, par groupe de silo (actuellement les ciels des silos de stockage communiquent entre eux et cela constitue un volume d'air qui aurait un effet de dilution de la concentration de CO en cas de début d'auto-échauffement dans un silo) ;
- S'appuyer sur les caractéristiques de suivi de la teneur en CO et en température indiquées dans le Tableau 6 ci-après pour la gestion de la prévention des phénomènes d'auto-échauffement et en cas de nécessité privilégier la vidange au plus tôt du silo en cas de suspicion ;
- Envisager de pouvoir inerte les ciels des silos de stockage par un gaz inerte.

3.4.2.1 Action sur la mesure de la température de la luzerne et sur la mesure du taux de CO

En termes de bonnes pratiques de prévention de phénomène d'auto-échauffement notamment dans des silos de stockage, il convient de piloter l'activation de l'inertage du ciel gazeux du silo de stockage :

- assurer le suivi de l'élévation de la concentration de CO (tout en s'assurant que la plage de mesure de CO soit entre 0 et 5 000 ppm) puis il convient de poursuivre la stratégie de lutte par un cycle d'inertage en fond du silo. La mesure du taux de CO dans le ciel du silo permet de connaître la présence et l'évolution d'un phénomène d'auto-échauffement de luzerne (plus le taux de CO dans le ciel gazeux est élevé, plus l'évolution du feu est importante) et de prévenir le risque encouru par les intervenants, le personnel et la population,
- assurer le suivi de la température (sonde de température avec une plage de mesure de 0°C à 500°C) de la luzerne dans la partie supérieure et la partie inférieure du silo, zones où des entrées d'air sont possibles (partie ciel gazeux du silo et circuit de vidange en partie basse où des vannes de vidange ne sont pas systématiquement étanches),
- utiliser les données des sondes de température réparties dans le stockage notamment à 1 m au-dessous du niveau supérieur du niveau du combustible et à 1 m au-dessus du fond du stockage (au-dessus de la zone de vidange) car les arrivées d'air se font à ces deux niveaux. Des sondes de température situées à différents niveaux peuvent renseigner notamment au début du sinistre sur le volume de produit en combustion et sur l'étendue de la combustion dans le volume (cartographie du sinistre). Néanmoins, la luzerne étant un bon isolant thermique, celles-ci ne renseignent vraiment que sur une distance d'environ 50 cm et surtout au début du sinistre. Par exemple, une guirlande de quatre sondes de température actuellement réparties dans l'axe des silos ne permet pas de fiabiliser la détection d'auto-échauffement et d'auto-inflammation dans les silos,
- assurer un plan de maintenance préventive et corrective des sondes CO et des sondes de température situées dans le silo de stockage de luzerne ; le ciel de silo de stockage doit être équipé d'un système de détection CO avec une gamme de mesure de 0 ppm à 10 000 ppm pour que le CO issu du phénomène d'auto-échauffement soit mieux détecté,
- mettre en place des vannes de vidange en partie inférieure du silo afin de maîtriser des entrées d'air (notamment en cas de vent, etc.) pouvant migrer dans le silo et favoriser des phénomènes d'auto-échauffement de luzerne,
- utiliser une caméra infra-rouge mobile pour visualiser la zone de combustion du silo la plus chaude et pour suivre l'évolution de cette zone en phase d'auto-échauffement avancé ou en phase d'auto-combustion.

L'inertage est fonction de la teneur en CO et du seuil de température dans l'enceinte de stockage. Les seuils et actions de sécurité sont indiqués dans le Tableau 6 suivant.

Seuil CO (ppm) Seuil de température de la luzerne (°C)	Action de sécurité Silo de stockage de luzerne
Seuil 1 : Tp < 50°C et CO = 250 ppm	Alarme en supervision, arrêt de l'alimentation du silo et suivi par l'opérateur de l'évolution des capteurs Tp et CO.
Seuil 2 : Tp > 55°C et 250 ppm < CO < 500 ppm	Alarme en supervision et appel hiérarchie et arrêt de l'alimentation du silo. Lancement manuel en supervision de l'inertage en partie basse et dans le ciel gazeux du silo et suivi de l'inertage. Si inertage efficace (Tp et CO stable) : Interdire la poursuite du remplissage du silo et prévoir la vidange du silo. Si inertage non efficace, vidange du silo dans les bennes sous silo.
Seuil 3 : Tp > 60°C et CO > 500 ppm	Alarme en supervision et arrêt de l'alimentation du silo de stockage. Lancement automatique de l'inertage en partie basse et dans le ciel gazeux du silo et suivi de l'inertage. Si inertage efficace (Tp et CO stable) : Interdire la poursuite du remplissage du silo et prévoir la vidange du silo. Si inertage non efficace, vidange du silo dans les bennes sous silo et arrosage (en cas d'extraction sous silo inefficace).
Seuil 4 : Tp > 70°C et CO > 1 000 ppm	Prévenir la hiérarchie. Vidange interdite. Appel des pompiers. Utiliser une caméra infra-rouge mobile pour visualiser la zone de combustion la plus chaude du silo et pour suivre l'évolution de cette zone.

Tableau 6 : Seuils et actions de sécurité liés à l'inertage de silo de stockage de luzerne

3.4.2.2 Action sur le transilage

Un cycle de transilage¹⁶ permet d'évacuer les calories générées par un phénomène d'auto-échauffement naissant par un échange thermique avec l'air ambiant (par effet de ventilation de l'air via une opération de transilage) mais n'est cependant pas efficace pour maîtriser un phénomène d'auto-inflammation d'où l'importance de définir et de rédiger des tendances d'augmentation des valeurs en CO et en température (ces critères de suivi des seuils dynamiques ne sont pas indiqués dans les consignes écrites).

Le transilage ne peut être efficace si la différence de température entre la matière et l'air ambiant est significatif (de l'ordre de la dizaine de degré) pour assurer une fonction de transfert de chaleur. Le transilage est une mesure de prévention principalement et historiquement utilisée dans la filière céréalière (notamment du transilage en période nocturne).

¹⁶https://www.arvalis-infos.fr/file/galleryelement/pj/fd/18/bd/af/stockage_n7_novembre_6615522081049930827.pdf

Un système de refroidisseur type échangeur thermique pourrait être utilisé en amont de l'alimentation du silo de transfert pour s'assurer que la luzerne soit suffisamment refroidie lors de son passage dans un tel refroidisseur.

L'inertage¹⁷ est une mesure de prévention de formation d'atmosphère explosive air / poussière pulvérulente et une mesure de lutte contre un auto-échauffement avancé / auto-inflammation d'un stockage de luzerne.

Action sur l'inertage des silos de stockage

A priori, l'inertage est une solution technique lorsque les deux conditions suivantes sont réunies : Feu à cœur de silo de stockage et cellule de stockage fermée et étanche.

L'inertage consiste à injecter un gaz inerte (dioxyde de carbone ou azote) pour évacuer l'oxygène disponible et les calories produites par l'incendie. L'objectif de l'inertage, est à la fois de stopper le feu en le privant de comburant, et de prévenir le risque d'explosion. L'extinction d'un sinistre par injection de gaz inerte dans les cellules concerne des produits tels que les céréales, la luzerne, les produits oléo-protéagineux, etc.¹⁸

En préalable à la mise en œuvre de l'inertage, les conditions suivantes doivent en général être remplies :

- Le silo doit être suffisamment étanche même si des fuites résiduelles comme celles pouvant être produites au voisinage des événements sont acceptables,
- Les points d'injection doivent être facilement accessibles et l'ensemble de la masse doit pouvoir être balayé.

Important : L'ensemble de ces conditions doivent être réunies préalablement à tout sinistre où l'exploitant doit disposer des procédures adaptées pour permettre une mise en œuvre rapide et efficace de ces mesures.

Le silo doit être suffisamment étanche (c'est à dire que le silo doit être suffisamment fermé) pour assurer un inertage efficace

En cas de prise d'air dans le silo, celui-ci doit être colmaté le mieux possible (vérifier régulièrement l'étanchéité de la vis planétaire en fond du silo béton).

Les silos fermés doivent être équipés pour l'injection efficace de l'azote. Les points d'injection doivent être facilement accessibles et l'ensemble de la masse doit pouvoir être balayé.

Important : L'ensemble de ces conditions doivent être réunies préalablement à tout sinistre où l'exploitant doit disposer des procédures adaptées pour permettre une mise en œuvre rapide et efficace de ces mesures.

La température à l'intérieur du silo doit pouvoir être contrôlée à demeure par des sondes de température afin de suivre l'évolution de la combustion chimique.

La mesure de la teneur du CO dans le ciel du silo doit être assurée afin de contrôler l'évolution de l'incendie avec du matériel adapté.

La mesure de la teneur en O₂ dans le ciel du silo doit être assurée pour évaluer le risque d'explosion et vérifier l'efficacité de l'inertage (pour que le ciel gazeux soit protégé contre le risque d'explosion le taux d'oxygène doit être à 5 %).

¹⁷ Rapport technique (FD CEN/TR 15281 : Janvier 2023) sur la prévention et la protection contre les ATEX – Guide de l'inertage pour la prévention des explosions

¹⁸ Connaître et faire face au risque aux risques des organismes stockeurs agricoles. Les principaux éléments à appréhender en cas de situations accidentelles. Tome 2. <https://www.calameo.com/read/00632687737edc9d1e5e9>

En termes de stratégie de lutte contre l'incendie de silos de stockage de luzerne, la mise en œuvre de l'inertage doit respecter un certain nombre de consignes¹⁹ :

- Prévoir à l'avance des piquages afin de pouvoir injecter le gaz inerte à distance sans intervention directe sur l'appareil pendant l'incident. Le gaz doit être introduit le plus rapidement possible sans mettre la poussière en suspension,
- Prévoir une quantité de gaz inerte suffisante avec un système d'inertage correctement dimensionné tel indiqué dans des normes en vigueur ou documents techniques en vigueur^{20 21}. Pour les installations à haut risque, il faut prévoir un premier stockage opérationnel (de l'ordre de la dizaine de m³ d'azote liquide) sur le site à tout moment pour inerte rapidement. On peut passer des accords avec un fournisseur local de gaz inerte pour un approvisionnement rapide afin de maintenir l'atmosphère inerte après épuisement du stock initial,
- Établir des seuils d'alarmes au point de vue échauffement, et des consignes d'intervention. Le déclenchement du système d'inertage doit être néanmoins manuel,
- Éviter d'injecter du gaz inerte à l'état liquide pour limiter les risques électrostatiques, le givrage et une expansion rapide du liquide,
- Avoir la possibilité d'isoler l'installation par silo afin de pouvoir suivre de façon précise la teneur en CO dans le ciel de chaque silo : Chaque silo devant être le plus étanche possible pour limiter la consommation du gaz inerte. Par défaut de pouvoir suivre la teneur en CO dans le ciel de chaque silo, il est possible de suivre la teneur de la concentration du CO par ilot de quelques silos,
- Mesurer la teneur en O₂ et en CO dans le ciel du silo pendant la phase d'inertage du ciel gazeux du silo. Il n'est pas nécessaire d'installer un détecteur à demeure, mais il faut avoir la possibilité de suivre l'évolution du taux d'oxygène en cas d'inertage,
- Inerte d'abord le ciel du silo pour éliminer le risque d'explosion, dans la masse du dépôt pour arrêter la combustion. Lorsqu'on injecte le gaz inerte dans la masse, on chasse les gaz de pyrolyse (inflammables dans le ciel). A noter que l'inertage peut arrêter l'évolution d'un feu couvant mais n'agit pas toujours sur la température de la poussière ; la réaction peut redémarrer dès que l'oxygène est introduit dans le système (pour lutter contre les feux couvants, le taux d'oxygène doit être si possible inférieur à 5%). L'inertage à l'azote doit être injecté en deux points distincts :
 - o l'inertage du ciel du silo doit être réalisé en 1er en début d'opération afin de s'assurer que la teneur en O₂ n'atteigne pas 5 % (ceci pour éviter la formation d'une ATEX air / CO dans le ciel du silo). La quantité d'azote à prévoir est de l'ordre de 1 Nm³ N₂/m³ du volume du ciel utile du silo²² ;
 - o puis, à la base du silo pour balayer l'ensemble de la masse stockée (l'opération d'inertage doit débuter par une injection dans le ciel du silo puis dans le bas afin de compenser le tirage thermique et éviter ainsi les entrées d'air dans le silo).

Lorsque l'injection d'azote dans le bas du silo aura commencé (seulement après avoir assuré l'inertage dans le ciel du silo), il faudra probablement attendre quelques jours avant qu'un effet d'extinction puisse être observé.

¹⁹ Connaître et faire face aux risques des organismes stockeurs de la filière agricole. Tome 2 : Les principaux éléments à appréhender en cas de situations incidentelles (Direction de la Sécurité Civile, COOP de France, Groupama, INERIS, Fédération du Négoce Agricole, Synacomex).

²⁰ NF EN ISO 20024 (Mars 2020) : Biocombustibles solides (Manutention et stockage en toute sécurité des granulés de biocombustibles solides dans des applications commerciales et industrielles)

²¹ CEN/TR 15281 (2006) : Atmosphères explosibles - Guide de l'inertage pour la prévention des explosions (norme actuellement en cours de révision Afnor/S66A)

²² Compléments du guide de l'état de l'art : Annexe B « Les procédures d'intervention dans les silos », INERIS 2008 (version 3).

NB 1 : À titre indicatif, un débit d'injection de 5 à 10 kg N₂/m²/heure²³ à condition que le matériau à préserver présente une porosité apparente de 50 %. Il est en outre possible d'augmenter le débit d'injection (au moins pendant la phase initiale), la vitesse de remplissage augmentera en conséquence.

NB 2 ²⁴ : Lors d'un sinistre incendie « classique », l'eau se révèle généralement être l'agent d'extinction le plus adéquat. Or, au regard du risque spécifique au phénomène d'auto-échauffement avancé / auto-inflammation que présente l'activité de stockage de luzerne, cette eau pourra, en cas d'utilisation excessive, représenter une problématique majeure voire irréversible (augmentation du poids en cellule et risque d'éclatement du silo, manutention difficile, inertage éventuel délicat, etc.).

L'utilisation de l'eau pour maîtriser un sinistre ne devra être envisagée que dans le cadre de l'extinction d'un feu directement accessible sur le produit. Dans ce cas précis, l'eau ne devra être utilisée qu'en très faible quantité par jet diffusé sur le grain. En revanche, lors d'un feu au cœur dans un silo de stockage, l'eau sera, à priori, à proscrire pour l'extinction.

Il convient alors d'utiliser de préférence de la mousse (moyen ou haut foisonnement) comme agent d'extinction pour des phénomènes d'auto-combustion de luzerne dans les silos de stockage et de transfert. De plus, il est recommandé d'équiper chaque silo de stockage ou de transfert d'un système de canalisation (colonne sèche, ou autres dispositifs) permettant de faciliter l'injection de mousse en cas de nécessité dans les silos de stockage et de transfert.

²³ Silo Fires : Fire extinguishing and preventive and preparatory measures, Henry Persson, MSB (Swedish Civil Contingencies Agency), MSB586 - July 2013.

²⁴ <https://www.calameo.com/books/005148363603d7ef959a8>

4 Conclusions

L'Ineris a apporté un appui technique en réponse de la saisine du BEA-RI du 15/05/2023 suite à l'explosion du 06 janvier 2023 au sein d'un silo de stockage de la société CRISTAL-UNION sur son site de Bazancourt (51) :

- Étape n°1 : Évaluer la réactivité de la luzerne à l'auto-échauffement :

De l'analyse des données indiquées au Tableau 1 et au Tableau 2, l'Ineris a apporté une évaluation bibliographique et expérimentale sur la réactivité de la luzerne :

- La luzerne sous forme pulvérulente, est une substance combustible pulvérulente et possède une réactivité élevée vis-à-vis de l'oxy-réactivité avec un pic exothermique en essai ATD/ATG pour lequel la température à laquelle l'écart de température entre l'échantillon et le témoin atteint 50°C est inférieure à 250°C avec une perte de masse de 90 % environ et est moyennement à peu sensible aux phénomènes électrostatiques ;
- La luzerne sous forme pulvérulente, est une substance susceptible de générer une ATEX en cas de mise en suspension dans l'air (transport par gravité ou par transfert pneumatique) pour une limite inférieure d'inflammabilité moyenne de 50 g/m³, avec une violence d'explosion de classe d'explosion de poussière St1 (Pmax = 4 à 6 bar et Kst = 50 à 100 bar.m.s⁻¹) ;
- La luzerne est sujette à l'auto-échauffement lors de son stockage. Un stockage de luzerne d'une hauteur de 16 m a une température critique d'auto-échauffement de l'ordre de 40°C ;
- La luzerne sous forme pulvérulente est susceptible pour apport de source d'inflammation active de s'auto-enflammer à l'état de nuage (TAlnuage de l'ordre de 360°C) ou en dépôt de matière de 5 mm d'épaisseur (TMI couche 5mm de l'ordre de 155°C). La Directive Européenne ATEX 2014/34/UE préconise que les températures de surface des parties d'appareils doivent, pour éviter l'inflammation des poussières en suspension, être nettement inférieures à la température d'inflammation du mélange d'air avec des poussières prévisibles. La formule issue de la norme CEI 60079-14 :2013 (disposition 5.6.3.2) permet de calculer la température maximale de surface de l'équipement en degrés Celsius du mélange poussière/air considéré, lorsque soumis à la méthode d'essai conformément à la norme CEI 60079- 0, suivant la relation suivante :

$$\text{Minima } (T_{\text{max}} \leq 2/3 T_{\text{MI}_{\text{nuage}}} \text{ et } T_{\text{MAX}} = T_{\text{MI}_{\text{couche}}} - 75 \text{ K}).$$

Pour la luzerne, cela signifie que la température en surface du silo ne doit pas dépasser 80°C.

- Étape n°2 : Reconstituer le mécanisme accidentel dans la cellule :

Il s'agissait, plus spécifiquement, pour l'Ineris de :

- Déterminer la cohérence entre l'inflammation en fond de cellule et les observations constatées. Les différentes modélisations EFFEX réalisées en considérant différentes hypothèses ont permis de conclure **qu'une explosion primaire en cellule C20 est cohérente avec les dégâts observés et que bien qu'il soit difficile de déterminer le lieu de l'inflammation au sein de la cellule, il n'y a pas de contradiction entre un scénario d'inflammation en fond de cellule et les dégâts constatés ;**
- Déterminer globalement l'énergie d'explosion produite. L'énergie globale d'explosion estimée est au minimum de l'ordre de 240 MJ.
- examiner les hypothèses d'une inflammation de poussières ou de gaz et évaluer les quantités de poussière ou de gaz de pyrolyse mises en jeu.

L'hypothèse d'une explosion d'un grand volume inflammable composé uniquement de gaz de pyrolyse mélangés à l'air paraît peu crédible, étant donné la faible réactivité constatée pour ce mélange. La possibilité qu'une inflammation d'un mélange gaz de pyrolyse / air déclenche une explosion de poussière est possible. Mais il est aussi possible que la mise en suspension de la poussière soit due au débâtissage de la luzerne, et non à une explosion des gaz de pyrolyse. Dans ce cas, le débâtissage aurait mis en contact la poussière de luzerne avec des particules rendues incandescentes par un phénomène d'auto-échauffement en cours.

Même s'il est difficile de déterminer précisément la quantité de poussière impliquée dans l'explosion, on peut conclure à partir de l'estimation de l'énergie globale d'explosion et d'autres constatations, qu'une quantité assez faible, de l'ordre de quelques dizaines de kg, était suffisante pour produire les effets observés, mais que la quantité réellement présente était certainement largement plus importante.

- Étape n°3 : Réaliser une revue des recommandations inspirées de l'expérience des céréaliers sur la gestion de l'auto-échauffement et la prévention des effets de voûte et de bâtissage sur les parois :

NB : Après des sollicitations et contacts auprès des céréaliers et pré-information auprès du BEA-RI, l'Ineris n'a pas reçu de confirmation de rendez-vous de la profession pour échanger sur leurs bonnes pratiques sur la gestion d'auto-échauffement et la prévention des effets de voûte et de bâtissage sur les parois. Ainsi, l'Ineris a exprimé auprès du BEA-RI ne pas avoir pu collecter des informations pour pouvoir répondre spécifiquement sur la prévention des effets de voûte et de bâtissage sur les parois, ce qui a été accepté par le BEA-RI.

En ce qui concerne la réactivité de solides combustibles tels que la luzerne en phase de stockage, deux principaux phénomènes sont envisagés :

- un phénomène d'explosion de poussière lors du chargement gravitaire ou pneumatique de silos de stockage,
- un phénomène d'auto-échauffement correspondant à une oxydation de la luzerne par l'oxygène de l'air (feu couvant à combustion lente) ou initialement activé par une activité de fermentation biologique par une teneur en humidité supérieure à 25 % de la luzerne :
 - la luzerne est une substance combustible et est réactive à l'oxydation chimique. Les températures de la luzerne dans les silos de stockage peuvent dépasser les températures critiques d'auto-échauffement du fait des dimensions de stockage des silos de luzerne,
 - des phénomènes de fermentation biologique (liée à un défaut qualité du produit par une teneur en humidité élevée ou une introduction accidentelle d'eau de pluie ou d'eau de lavage dans les silos) peuvent augmenter la température de la luzerne jusqu'à 75°C environ et passer le relais au phénomène d'auto-échauffement du produit et faciliter ainsi l'atteinte de sa température critique,
 - le système de détection de CO dans les silos de stockage doit être suffisamment précoce pour détecter convenablement un phénomène d'auto-échauffement : de plus, les orifices de vidange des silos (vis planétaires, écluse rotative de vidange) doivent être étanches au passage de l'air afin de limiter les entrées d'air et ainsi limiter les démarrages d'auto-échauffement dans la partie inférieure des silos.
- Les techniques d'intervention relative aux installations de stockage de grains en cas d'explosion de poussières et d'incendie sont bien connues à la lumière du retour d'expérience et sont définies au § IV du guide de référence rédigé par les céréaliers²⁵. La gestion de la prévention et de la protection du risque d'auto-échauffement avancé ou d'auto-inflammation des silos de stockage peut s'appuyer sur les principes suivants :
 - Optimiser la mise en place de la surveillance de la concentration de la teneur en CO dans les ciels gazeux des silos de stockage et utiliser avec parcimonie le transilage ;

²⁵ Connaître et faire face au risque aux risques des organismes stockeurs agricoles. Les principaux éléments à appréhender en cas de situations accidentelles. Tome 2. <https://www.calameo.com/read/00632687737edc9d1e5e9>

- Favoriser le suivi de la mesure de concentration de CO dans le ciel de chaque silo de stockage, ou par défaut, par groupe de silo (actuellement les ciels des silos de stockage communiquent entre eux et cela constitue un volume d'air qui aurait un effet de dilution de la concentration de CO en cas de début d'auto-échauffement dans un silo) ;
- S'appuyer sur les caractéristiques de suivi de la teneur en CO et en température indiquées dans le Tableau 6 pour la gestion de la prévention des phénomènes d'auto-échauffement et en cas de nécessité privilégier la vidange au plus tôt du silo en cas de suspicion ;
- Envisager de pouvoir inerte les ciels des silos de stockage par un gaz inerte.

5 Annexes

Liste des annexes :

- Annexe 1 : Lettre de saisine du BEA-RI du 15/05/2023 (1 page) ;
- Annexe 2 : Résultats des mesures d'essais (9 pages) ;
- Annexe 3 : Description des essais (5 pages) ;
- Annexe 4 : Présentation de l'outil de calcul phénoménologique EFFEX (3 pages).

ANNEXE 1

-

Lettre de saisine du BEA-RI du 15/05/2023

1 page



**MINISTÈRE
DE LA TRANSITION
ÉCOLOGIQUE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*

**Inspection générale de l'environnement
et du développement durable
Bureau d'Enquêtes et d'Analyses
sur les risques industriels**

BEA-RI
Risques industriels

Mission conjointe BEA-RI - Ineris

Le BEA-RI a décidé le 10/01/2023 d'ouvrir une enquête sur l'évènement survenu le 06/01/2023 au sein de l'entreprise Cristal Union, site soumis à autorisation au titre de la réglementation ICPE et située à Bazancourt (51).

Deux enquêteurs du BEA-RI se sont rendus sur site. Selon les premiers éléments de l'enquête, cet accident semble être la conséquence d'une explosion de poussières de luzerne au sein d'un silo, elle-même rendue possible par la présence en quantité importante de granulés et de poussières de luzerne amalgamées sur les parois du silo.

Dans la continuité des constats conjoints dressés lors de cette visite, nous souhaiterions mobiliser l'expertise de l'Ineris, dans le cadre de sa coopération avec le BEA-RI, pour :

- Evaluer la réactivité de la luzerne à l'auto-échauffement : bibliographie Ineris historique et essais de caractérisation de l'inflammabilité d'un échantillon de luzerne à fournir par l'industriel,
- Reconstituer le mécanisme accidentel dans la cellule :
 - o Déterminer la cohérence entre l'inflammation en fond de cellule et les observations constatées (jet de poussière, rupture dalle béton, puis explosion secondaire horizontale en tête),
 - o Déterminer globalement l'énergie d'explosion produite,
 - o Evaluer les quantités de poussière ou de gaz de pyrolyse mises en jeu et examiner les hypothèses d'une inflammation de poussières ou de gaz,
- Revue des recommandations inspirées de l'expérience des céréaliers sur la gestion d'auto-échauffement et la prévention des effets de voûte et de bâtissage sur les parois.

Cette expertise pourra autant que de besoin s'appuyer sur des essais en laboratoire selon des protocoles qui seront présentés aux enquêteurs.

Ces essais seront réalisés à partir des échantillons qui auront été définis par le BEA-RI auprès de l'industriel et expédiés à l'Ineris par ce dernier.

Nous souhaiterions pouvoir disposer de vos conclusions au travers d'un rapport (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 15/05/2023

Laurent Olivé

ANNEXE 2

-

Résultats des mesures d'essais

9 pages

Résultats Échantillon Réf. CRISTAL UNION «Luzerne»-référence Ineris 23AM101

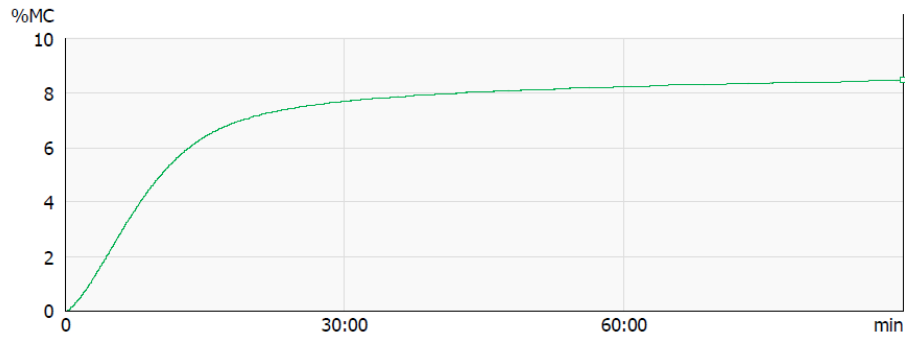
Valeurs mesurées et courbe de séchage

Résultat final

8.47%MC

Durée

90:00 min



Commentaire:

Poids initial	20.879 g	Inclinomètre	de niveau
Poids sec	19.111 g		
Teneur en humidité	1.768 g		

Figure A1 : Évolution du taux d'humidité en fonction du temps de l'échantillon Ineris 23AM101 (105°C pendant 90 min)

Date de l'essai	N° Essai ERIP	N° réception	N° prestation	N° contribution
18/04/2023	23-233	23AM101	222994	
Date(s) de réception	05/04/2023			
Provenance (client)	BEA RI			
Type d'appareillage d'essais	ERWEKA			
Nom de l'opérateur	GOMES	Vlea	JG	

Description et identification de l'échantillon soumis à essai	
Nom de l'échantillon	LUZERNE
Description de la poussière	GRANULE VERT

ECME			
Balance	M-A2-9895	Tamiseuse mécanique	M-A2-9621

• **Tambour de friabilité**
un point de référence à réaliser dans les conditions de la méthode MT193 (cf. PJ). C'est-à-dire masse = 60 g, vitesse= 25 ~~rpm~~ et temps= 240 secondes (ce qui équivaut à 100 tours).

Tambour de friabilité					
Essai N°	Masse initiale en g	Masse finale en g	% Friabilité	Vitesse en rpm	Temps en seconde
1	60	59,66	0,56	25	240
2	60,12	60,01	0,18		
3	60	59,84	0,26		
4	60,05	59,90	0,25		
5	60,2	60,1	0,16		
Moyenne % Friabilité			0,28		



Clichés photographiques de l'essai au tambour de friabilité

Ce document ne peut être communiqué à des tiers sans autorisation écrite du responsable de l'Entité concernée

• **Tambour d'abrasion**

un point de référence à réaliser dans les conditions de la méthode MT193 (cf. PJ). C'est-à-dire masse = 60 g, vitesse= 25 ~~rpm~~ et temps= 240 secondes (ce qui équivaut à 100 tours).

Tambour avec chicsue					
Essai N°	Masse initiale en g	Masse de refus finale en g	% Friabilité	Vitesse en rpm	Temps en seconde
1	60,02	0,5	0,83	25	240
2	60,07	0,5	0,83		
3	60,2	0,3	0,49		
4	60,33	0,2	0,33		
5	60,20	0,5	0,83		
Moyenne % Friabilité			0,66		



Clichés photographiques de l'essai au tambour d'abrasion

Ce document ne peut être communiqué à des tiers sans autorisation écrite du responsable de l'Entité concernée.

- Granulométrie de l'échantillon après passage dans le Tambour de friabilité

Durée de tamisage (minutes) : 30 Amplitude du tamisage (%) : 80			Masse tamisée (g) : 299,6		
ECME tamis	Diamètre tamis vide	Masse tamis vide (g)	Masse tamis après tamisage avec échantillon (g)	Masse nette du refus (g)	Pourcentage du refus (%)
-	<input checked="" type="checkbox"/> 1000	305,1	570,7	265,6	88,7
M-A2-9623	<input checked="" type="checkbox"/> 500	278,6	291,4	12,8	4,3
M-A2-9608	<input checked="" type="checkbox"/> 315	253,5	259,8	6,3	2,1
M-A2-0229	<input type="checkbox"/> 250				
M-A2-9605	<input checked="" type="checkbox"/> 180	249,9	255,4	5,5	1,8
M-A2-0228	<input type="checkbox"/> 125				
M-A2-9604	<input checked="" type="checkbox"/> 100	240,6	245,3	4,7	1,6
M-A2-9603	<input checked="" type="checkbox"/> 63	237,8	240,0	2,2	0,7
M-A2-9602	<input checked="" type="checkbox"/> 40	235,8	237,2	1,4	0,5
M-A2-9601	<input checked="" type="checkbox"/> 32 µm	225,2	226,2	1,0	0,3
Fond	-	423,6	423,7	0,1	0,0
			Total	299,6	100

Ce document ne peut être communiqué à des tiers sans autorisation écrite du responsable de l'Entité concernée

3 / 4

Mise en application :

• Granulométrie de l'échantillon après passage dans le Tambour d'abrasion

Durée de tamisage (minutes) : 30 Amplitude du tamisage (%) : 80		Masse tamisée (g) : 300,5			
ECME tamis	Diamètre tamis vide	Masse tamis vide (g)	Masse tamis après tamisage avec échantillon (g)	Masse nette du refus (g)	Pourcentage du refus (%)
-	☑ 1000	305,1	589,1	264,0	87,9
M-A2-9623	☑ 500	278,6	293,1	14,5	4,8
M-A2-9606	☑ 315	253,5	259,9	6,4	2,1
M-A2-0229	☐ 250				
M-A2-9605	☑ 180	249,9	255,6	5,7	1,9
M-A2-0228	☐ 125				
M-A2-9604	☑ 100	240,6	245,2	4,6	1,5
M-A2-9603	☑ 63	237,8	240,2	2,4	0,8
M-A2-9602	☑ 40	235,8	237,5	1,7	0,6
M-A2-9601	☑ 32 µm	225,2	226,4	1,2	0,4
Fond	-	423,6	423,6	0,0	0,0
Total				300,5	100

Ce document ne peut être communiqué à des tiers sans autorisation écrite du responsable de l'Entité concernée

4 / 4

Mise en application :

Figure A2 : Essai de caractérisation de friabilité et d'abrasion de l'échantillon Ineris 23AM101

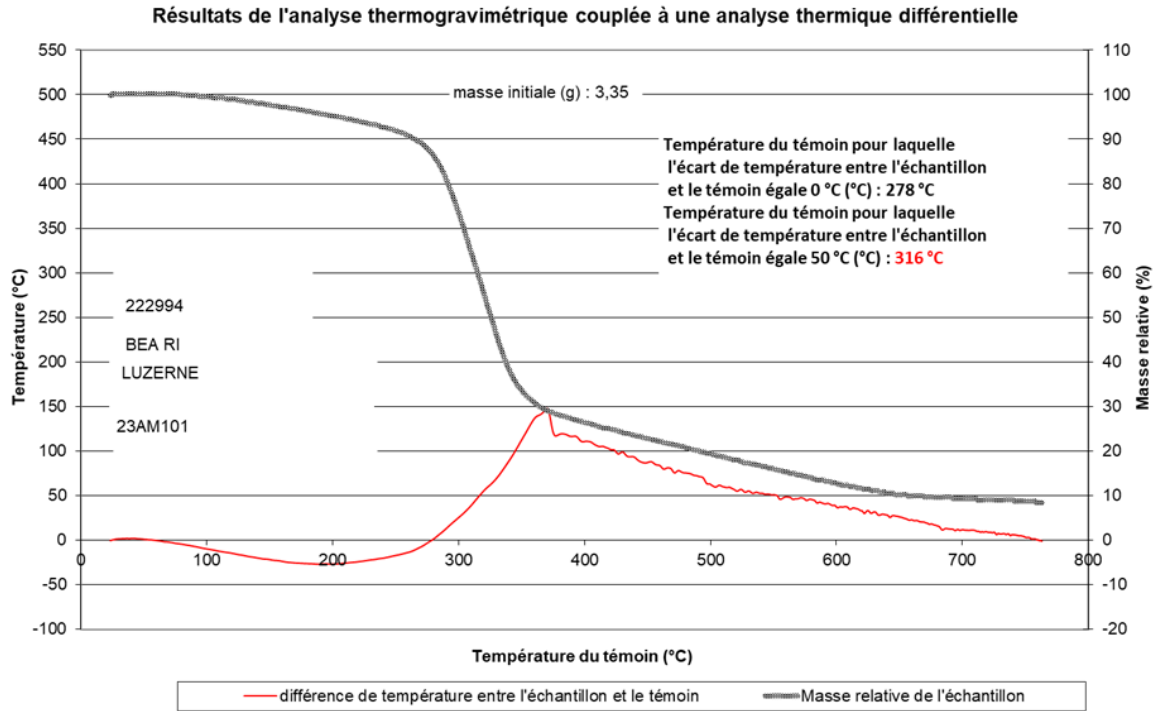


Figure A3 : Analyse ATD-ATG de l'ambiante à 800°C de l'échantillon Ineris 23AM101

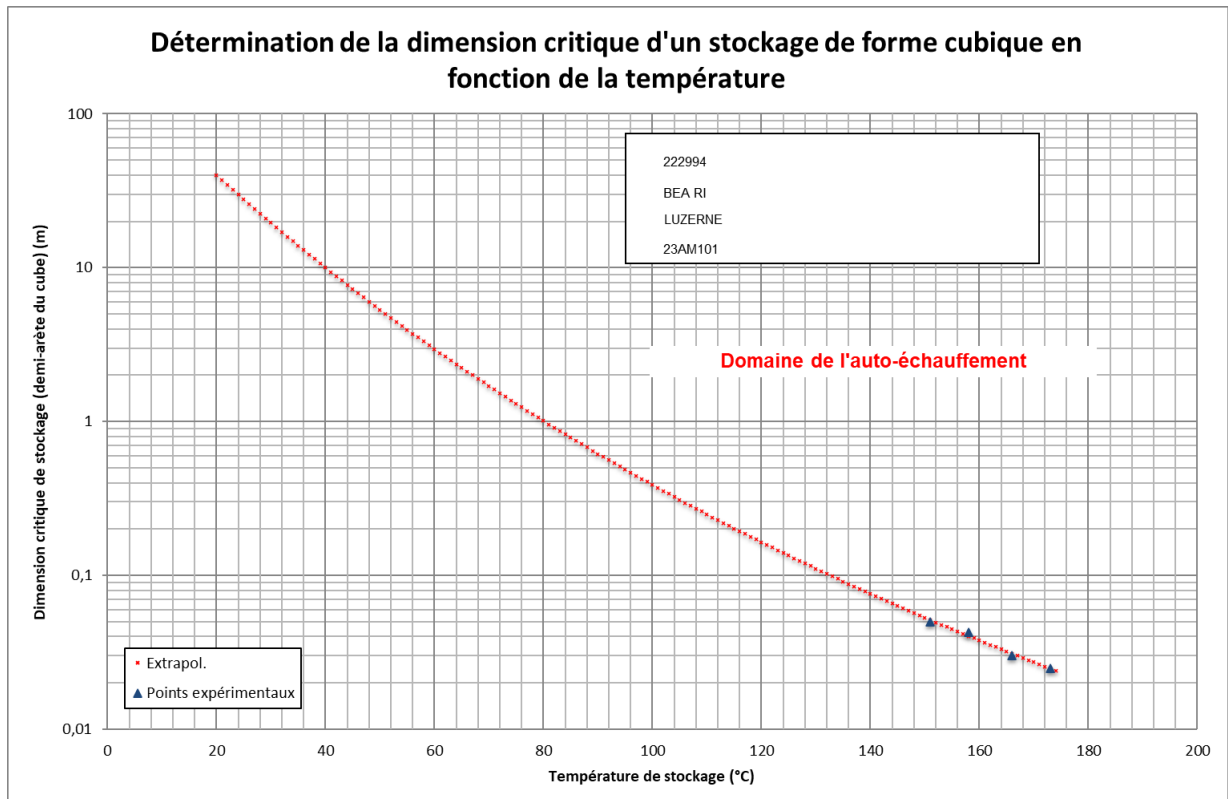


Figure A4 : Courbe d'extrapolation selon la méthode Frank-Kameneskii des résultats des essais en étuve isotherme de l'échantillon Ineris 23AM10123AM101

Nota : ce document a été écrit et est géré par *DROCAR/ANAE*

Responsable d'affaires :	EVANNO Sébastien	Date de réception des objets soumis à essai :	07/04/2023
Demandeur interne : (Direction/unité)	S. Evanno IDE/ERIP	Prestation n° :	222994
Demande de travail n° :	22957	Contribution n° :	904635
Demande du :	07/04/2023	Date du rapport :	17/04/2023

Exposé de la demande : (description des objets soumis à essai si besoin) :
Essai en four tubulaire de 150°C à 400°C sous balayage d'air sur un échantillon de luzerne.

Description du mode opératoire, dates de traitement (extraction, minéralisation...) et d'analyse, nom des opérateurs :

Date	Traitement / analyse	Référentiel MO, norme / version	Opérateur
12 et 13/04/23	Essai en four tubulaire et dosage des gaz en ligne par μ GC/TCD	/	NC

La prestation est réalisée au sein des laboratoires ANAE, selon les référentiels suivants :

- ISO 9001 seul
- COFRAC NF EN ISO 17025
- Art. annexé II à l'art. D523-8 du code de l'Environnement du 16/10/07 (BPL)

*Le présent rapport d'essai ne concerne que les objets ou produits soumis à essai tels que reçus.
L'incertitude sur les résultats et les contrôles qualité peuvent être communiqués sur demande.*

Résultats :

Réf. INERIS	Plage T°	H ₂	CO ₂	CH ₄	CO	Ethane	Propane	n Butane
		mg/g	mg/g	mg/g	mg/g	mg/g	mg/g	mg/g
23AM101	De 150°C à 300°C	0,002	332	1,03	40,9	0,07	0,19	0,55
	De 300°C à 400°C	0,97	691	29,8	33,5	2,43	1,71	0,18

L'essai a été réalisé entre 149 °C et 412 °C avec une montée régulière en température à 1,15 °C/min pendant 3h50.

Prise d'essai de 3,12g et masse résiduelle après essais de 0,28g.

Perte de masse : 91%

Observations (interférents, écarts par rapport aux normes et méthodes appliquées, etc...)

Les analyses ont montré deux pics d'émissions :

- le premier entre 150°C et 300°C avec un maximum aux alentours de 220°C ;

- le deuxième entre 300°C et 400°C avec un maximum aux alentours de 320°C.

Les résultats correspondent, pour chaque plage de température, à la somme des quantités mesurées rapportée à la prise d'essai.

D'autres composés organiques ont été détectés (pics présents entre l'éthane et le n-butane), mais n'ont pas pu être identifiés.

Objets soumis à essais : Entièrement consommés


Stockés dans le laboratoire jusqu'à destruction

Stockés dans le laboratoire jusqu'à retour au demandeur

Sauf avis contraire et hors BPL, les objets soumis à essai et leur préparation seront éliminés 4 semaines après l'envoi des résultats. Dans le cas d'études BPL, les éléments d'essais seront conservés 3 mois.

Le présent rapport d'essai ne concerne que les objets ou produits soumis à essai tels que reçus.

L'incertitude sur les résultats et les contrôles qualité peuvent être communiqués sur demande.

		RESULTATS D'ANALYSES		Parc Technologique Alata BP2 60550 VERNEUIL-EN-HALATTE Tél : 03.44.55.66.77 www.ineris.fr	
	Technicien	Responsable technique	Responsable d'unité		
NOM	CHATELLIER Nicolas	PAPIN ARNAUD	BIAUDET HUGUES		
Visa				Document approuvé le 17/04/2023 par BIAUDET HUGUES	

*Le présent rapport d'essai ne concerne que les objets ou produits soumis à essai tels que reçus.
L'incertitude sur les résultats et les contrôles qualité peuvent être communiqués sur demande.*

IM-1140AJ - Applicable

3/3

Mise en application : 25/11/2020

Ce document ne peut être communiqué à des tiers sans autorisation écrite du responsable de l'Entité concernée

**Figure A5 : Essai en four tubulaire de 150°C à 400°C sous balayage d'air
sur l'échantillon Ineris 23AM101**

ANNEXE 3
-
Description des essais

5 pages

Répartition granulométrique par tamisage mécanique

PRINCIPE

Le tamisage consiste à mesurer le poids d'un échantillon soumis à essai retenu par les toiles de mailles de tamis calibrés. Chaque tamis est superposé par taille de maille décroissante selon une progression mathématique. Le poids d'échantillon retenu (refus de tamis) peut alors être connu et permet d'obtenir le pourcentage de refus pour chaque diamètre de maille par rapport au poids total de produit.

MODE OPERATOIRE

L'opération consiste à tamiser 100 g d'échantillon sur une table vibrante pendant 30 minutes avec des tamis (grilles à maille carrée) de diamètre différents (1000, 500, 315, 180, 100, 63, 40 et 32 μm). Les refus récoltés sur chaque tamis sont pesés sur une balance.

Détermination du taux d'humidité

DISPOSITIF D'ESSAI

L'analyse est conduite à l'aide d'un dessiccateur thermique HX204, qui fait appel à une technologie halogène qui permet un chauffage rapide et un contrôle précis de la température. Le dessiccateur thermique est équipé d'une cellule de pesée MonoBloc et d'un récepteur de charge suspendu haute performance, avec une résolution de 0,1 mg maximum. Les courbes de séchage permettent de visualiser l'évolution de la mesure à l'écran. Les graphiques de contrôle affichent la tendance du taux d'humidité en continu (résolution de 0,001 % TH et répétabilité de 0,01 % pour un échantillon de 10 g).

MODE OPERATOIRE

L'échantillon est réparti dans une coupelle en aluminium elle-même déposée dans le dessiccateur thermique et séché à l'aide d'une lampe halogène à une température de 105°C pendant 90 minutes. Le taux d'humidité est calculé par pesée différentielle au cours du séchage et suivi en continu.

Caractérisation de la friabilité et de l'abrasion d'une poudre ou d'un comprimé

DISPOSITIF D'ESSAI

Les systèmes particuliers sont classés selon leurs propriétés de taille, forme, porosité inter et intra-particulaire.

Deux grandes catégories sont distinguées :

- Poudre cohésive,
- Poudre à écoulement libre.

Le mélange des poudres est fortement dépendant des propriétés d'écoulement des constituants, elles-mêmes liées directement aux caractéristiques des poudres, telles que :

- Distribution granulométrique,
- Cohésion,
- Taux d'humidité
- Formes et propriétés de surface des particules
- Densité apparente et tassée,
- Les forces de Van Der Waals,
- Les charges électrostatiques,
- La friabilité impacte par exemple le choix du mélangeur (mélangeur convectif, cuve tournante...) car la formation de poussières peut se révéler gênante dans plusieurs procédés.

La friabilité décrit la tendance des particules à se désintégrer sous l'effet des contraintes mécaniques d'abrasion et d'attrition. Les petites particules ainsi formées modifient les propriétés d'usage de la poudre (masse volumique du lit, coulabilité, propriété d'instantanéité...). Pour les agglomérats, on parlera de résistance mécanique : elle dépend en particulier de la nature et de la consolidation des ponts établis entre les particules durant l'agglomération. Plusieurs techniques sont employées pour mesurer la friabilité des poudres (Bemrose et Bridgwater, 1987 ; Yan et Barbosa-Canovas, 2001 ; Utsumi et al., 2001). Elles consistent, en général, à soumettre la poudre à des chocs mécaniques (vibrations) dans un appareil spécifique pendant un temps donné.

L'un des critères de test de la résistance mécanique des comprimés et des noyaux est le test de friabilité et d'abrasion. Au cours du processus d'enrobage, de transport et d'emballage, le comprimé perd un peu de poids.

Le tambour de friabilité a été conçu pour tester la résistance au roulement et aux chocs des comprimés. Une fracture prématurée ou un signe d'usure sur les bords indique que ces comprimés peuvent ne pas résister aux rigueurs du transport. Le tambour d'abrasion permet d'effectuer des essais d'abrasion sur l'attrition (usure) des comprimés causée par le frottement du produit pendant le transport.

Pour mesurer la perte de poids, les échantillons sont comptés et pesés. Ensuite, le test de friabilité est effectué. Les échantillons sont culbutés à chaque tour du tambour de l'instrument de test de friabilité. Une fois le test de friabilité terminé, les échantillons doivent être dépoussiérés et pesés à nouveau. La différence de poids avant et après le test est déterminée comme étant la friabilité ; elle ne doit généralement pas dépasser 1 %. Les comprimés d'un poids supérieur à 650 mg, les échantillons d'un diamètre supérieur ou de forme irrégulière sont testés alors que l'instrument est soulevé d'un côté à l'aide de pieds pliables jusqu'à un angle de 10 %.

Analyse Thermique Différentielle et Thermique Gravimétrique

PRINCIPE

L'Analyse Thermique Différentielle et l'Analyse Thermique Gravimétrique permettent l'étude simultanée des comportements thermodynamiques des matériaux.

Le principe de l'Analyse Thermique Différentielle consiste à suivre l'évolution de la différence de température (ΔT) entre l'échantillon étudié et une référence inerte, c'est-à-dire dépourvu d'effets thermiques dans le domaine de température étudié. L'Analyse Thermique Gravimétrique permet de mesurer les variations de masse (Δm) d'un échantillon au cours de son chauffage.

MODE OPERATOIRE

Un échantillon du produit à examiner, placé dans une nacelle en toile métallique identique à celle du témoin, est introduit dans un four à température ambiante, dont on élève progressivement la température à la vitesse de 5°C/min (rampe de température variable de 0,5°C/min à 5°C/min, plage de température variable de l'ambiante à 800°C).

La variation de masse de l'échantillon placé dans le four est suivie à l'aide d'un module de pesée électronique en fonction du temps. Les températures de l'échantillon (T_E) et d'une substance inerte choisie comme référence (T_R) sont également enregistrées en fonction du temps. Les dispositions adoptées permettent de préchauffer le courant d'air de balayage (440 NI/h) à la même température que le four (**Figure B1**).

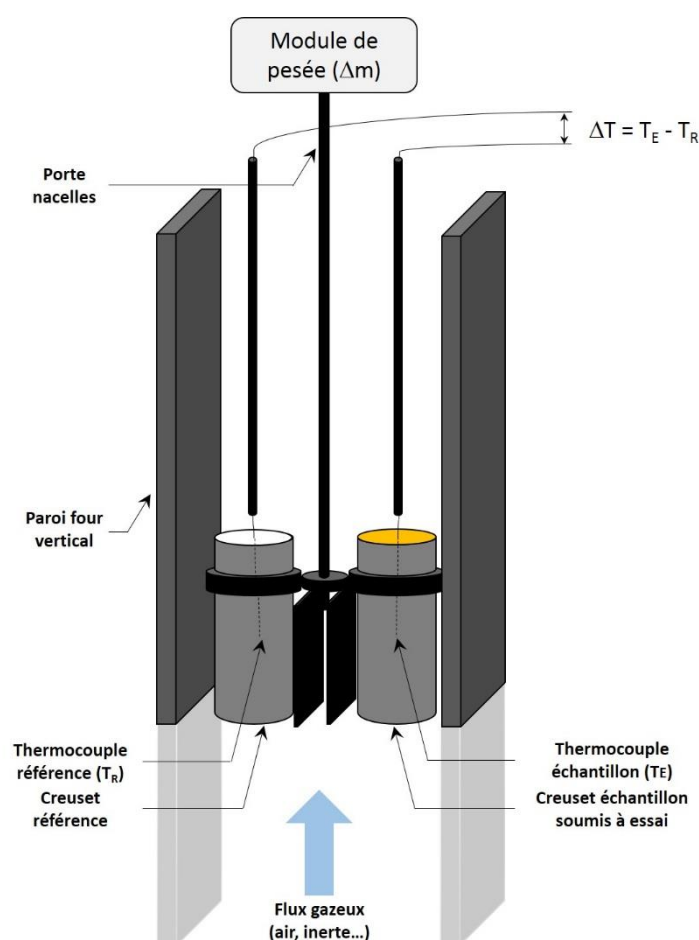


Figure B1 : Schéma général de l'ATD/ATG

Dans ces conditions, en comparant les températures de l'échantillon (TE) et de la substance inerte choisie comme référence (TR), il est possible de mettre facilement en évidence de façon semi-quantitative tout phénomène endo ou exothermique qui pourrait se produire au cours du chauffage.

L'emballement d'une réaction d'oxydation est pris en compte dès lors que la différence ΔT entre l'échantillon et la référence est égale ou supérieur à 50°C. Ceci permet d'enregistrer seulement les réactions exothermiques franches sans tenir compte des faibles différences de températures entre l'échantillon et le témoin pouvant s'expliquer par une conductivité thermique élevée de l'échantillon, une réaction d'oxydation ne s'accompagnant pas d'une élévation de température susceptible de présenter un danger, etc...

Les valeurs de température de la substance de référence au début de l'emballement d'une réaction d'oxydation permettent de :

- définir le danger du produit testé vis-à-vis du risque d'auto-échauffement,
- de hiérarchiser l'oxy-réactivité de différents échantillons afin de procéder à des essais complémentaires sur l'échantillon représentant le plus de risque d'auto-échauffement.

Un échantillon est considéré comme ayant une réactivité élevée vis-à-vis de l'oxy-réactivité lorsque la température du témoin, pour un $\Delta T = 50^\circ\text{C}$, est inférieure ou égale à 250°C. L'essai doit être complété par un essai d'auto-échauffement visant à déterminer le domaine de la taille critique en fonction de la température à partir duquel un risque d'auto-inflammation existe.

La réactivité est moyenne lorsque la valeur de la température témoin, pour un $\Delta T = 50^\circ\text{C}$, est comprise entre 250°C et 400°C. L'essai d'auto-échauffement n'est à réaliser que pour des stockages de grande taille à température ambiante ou une utilisation du produit à des températures élevées.

L'oxyréactivité d'un échantillon est faible lorsque la valeur de la température témoin, pour un $\Delta T = 50^\circ\text{C}$ est supérieure à 400°C.

Essais d'auto-échauffement en étuves isothermes (EN 15188)

PRINCIPE

L'essai consiste à déterminer la température critique d'auto-inflammation de volumes cubiques croissants d'un combustible solide. Lorsque le volume des récipients cubiques augmente, la température minimale d'auto-inflammation diminue et il est possible en théorie d'extrapoler jusqu'à un volume de stockage plus important.

MODE OPERATOIRE

Pour cela, les échantillons sont placés à température ambiante dans des récipients de forme cubique dont les parois sont formées par une toile métallique à mailles suffisamment fines pour éviter le tamisage, mais qui ne freinent pas la diffusion d'oxygène. Le récipient est ensuite introduit à pression atmosphérique dans une étuve isotherme ventilée à air chaud régulée à une température donnée. A l'aide d'un thermocouple placé au centre de l'échantillon, on observe si la température de l'échantillon se stabilise à la température de l'étuve, ou si elle s'élève rapidement.

Un nouvel essai est ensuite effectué à une température plus élevée ou plus basse suivant le résultat de l'essai précédent, de façon à encadrer à 5°C près la température de l'étuve qui conduit à un auto-échauffement de l'échantillon. Cette température est appelée température critique d'auto-échauffement.

En réalisant des essais sur différents volumes, il est possible de corréliser la température d'auto-échauffement à la dimension du stockage. En effet, les résultats des essais de stockage en étuve isotherme peuvent être corrélés par une loi mathématique s'appuyant sur la théorie de l'auto-échauffement pour des dimensions plus importantes que celles étudiées expérimentalement et/ou pour des formes différentes. Ce calcul d'extrapolation fait appel notamment à l'hypothèse d'une libre diffusion de l'oxygène de l'air dans le dépôt et à l'échange thermique par conduction dans le matériau. La dimension critique est déterminée pour un stockage de forme cubique cylindrique ou plan. En effet, le calcul intègre un facteur dépendant de la forme du stockage.

Essai en four tubulaire de 150°C à 400°C sous balayage d'air

Le four tubulaire de l'Ineris permet d'étudier, sous atmosphère contrôlée, la dégradation thermique d'échantillons solides ou liquides. Les gaz et les particules émis lors de la combustion sont piégés et analysés. [Norme de référence : NF X 70-100-2].

Cf Fiche Ineris :

<https://prestations.ineris.fr/fr/solutions-thematiques/substances-produits/proprietes-dangers/caracterisation-degradation-thermique>

ANNEXE 4

-

Présentation de l'outil de calcul phénoménologique EFFEX

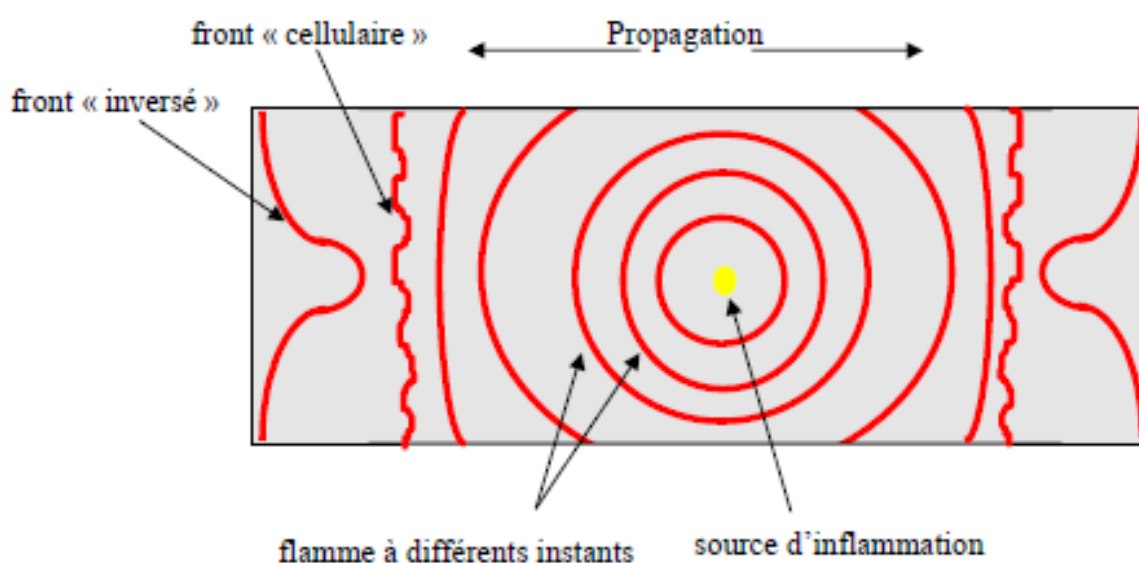
3 pages

Présentation de l'outil de calcul phénoménologique EFFEX

L'explosion de gaz ou de poussières, confinée ou partiellement confinée, peut être modélisée avec l'outil phénoménologique EFFEX. Il permet de calculer la montée en pression dans le confinement en prenant en compte la réactivité du mélange inflammable gazeux, la géométrie et la présence d'ouvertures permanentes.

La situation courante correspond à une fuite de gaz inflammable dans un espace confiné ou partiellement confiné.

Un mélange inflammable peut être formé dans un espace confiné. Sa taille, sa composition et son agitation interne (turbulence) dépendent du type de fuite et des caractéristiques géométriques du confinement. Si une source d'inflammation est située dans la zone inflammable du nuage, celui-ci s'allume et une flamme se propage depuis le point d'inflammation. La figure 10 ci-après montre le développement de la flamme dans le confinement.



C1 : Développement de la flamme dans le confinement

La flamme se développe sphériquement autour du point d'inflammation. Sur son chemin, la flamme transforme les gaz frais en gaz brûlés chauds. Leur température typique est comprise entre 1 000°C et 2 000°C, ce qui aboutit à une large expansion des gaz brûlés.

L'excédent de volume produit par unité de temps est proportionnel à :

- La surface de flamme,
- Le taux de combustion soit la consommation volumique par unité de temps des gaz frais par élément de surface de flamme. La dimension de ce paramètre est une vitesse et cette dernière est souvent appelée vitesse de combustion.
- Le taux d'expansion thermique.

Cette production de gaz brûlés est responsable de la montée en pression dans le confinement. La vitesse de montée en pression augmente quand ces trois paramètres augmentent.

Le taux d'expansion thermique est une propriété du mélange gazeux qui peut être prédite. Il dépend uniquement du dégagement de chaleur lié à la réaction de combustion. Il peut être exprimé par application de la première loi de thermodynamique :

$$\tau = \frac{\rho_0}{\rho_b} \approx \frac{T_b}{T_0} = \frac{\Delta H_{comb}}{c_p \cdot T_0} + 1$$

Où :

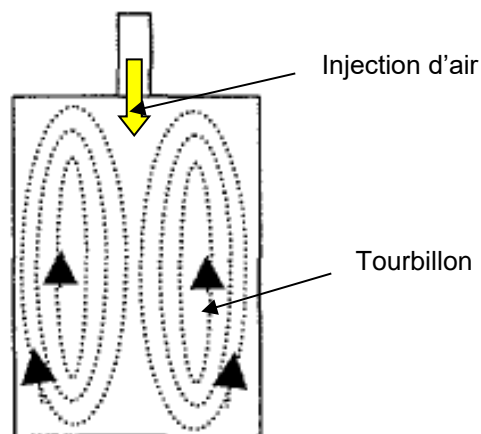
- ΔH_{comb} est l'enthalpie de réaction (combustion) à T_0 par unité de masse du mélange gazeux.
- T_0 et T_b sont respectivement les températures des gaz frais et des gaz brûlés pour une réaction adiabatique
- ρ_0 et ρ_b sont respectivement les masses volumiques des gaz frais et gaz brûlés.
- c_p est la capacité calorifique massique moyenne du mélange de gaz brûlés.

C'est un paramètre intrinsèque qui dépend uniquement de la composition du mélange et non pas de la façon dont la flamme se propage. Sa valeur est comprise entre 5 et 8 pour des hydrocarbures typiques mélangés à l'air.

La vitesse de combustion dépend à la fois de la nature du mélange et de la vitesse à laquelle la chaleur est transférée des gaz brûlés aux gaz frais. En effet, les produits de combustion transmettent la chaleur aux gaz frais par diffusion thermique. La combustion peut être décrite par les lois thermocinétiques de type lois d'Arrhenius. Leur paramétrage dépend uniquement des propriétés intrinsèques du mélange tout comme la vitesse de combustion, aussi connue comme la vitesse de flamme laminaire, S_{ad} . Cette dernière dépend de la concentration en produit inflammable au sein du nuage. Pour un gaz, cette vitesse est maximale pour un mélange en proportions stœchiométriques et décroît dès lors qu'on se rapproche des limites du domaine d'inflammabilité.

Les mécanismes de turbulence, toujours présents, ont un impact favorable sur la diffusion de la chaleur vers les gaz frais et augmente la vitesse de flamme. La surface de flamme subit des changements durant sa propagation. Dans un volume relativement allongé, et en cas d'inflammation centrale, la flamme se développe initialement sphériquement jusqu'à atteindre des parois. A leur contact, des portions de surface de flamme disparaissent et restent deux éléments de flamme séparés se propageant dans des directions opposées. Le front de flamme peut également devenir cellulaire ou courbés vers les gaz brûlés sous l'effet des instabilités de Darrieus-Landau. L'allongement du confinement peut jouer sur ces effets physiques.

Dans tous les cas, la surface de flamme maximale dépend des dimensions du confinement et particulièrement de sa section transversale.



C2 : Schéma représentant les mécanismes de turbulence

L'évolution de pression dans le confinement est considérée homogène et uniquement liée à l'expansion des produits de combustion. Cette hypothèse forte est valide si le taux d'allongement du confinement (ratio entre la longueur de confinement et son diamètre hydraulique) est inférieur à 20.

Sur son trajet, la flamme convertit les gaz frais en gaz brûlés. On suppose également que ces deux zones évoluent de manière isentropique. Avec une loi d'état des gaz parfaits, les principales équations s'écrivent :

$$d/dt[\Delta P(t)]/\Delta P(t) = \gamma \cdot Q_{fl}(t) / V$$

$$Q_{fl}(t) = St \cdot A_f(t) \cdot (\tau - 1) \cdot T_0 / T$$

Où

- $\Delta P(t)$ est la surpression interne à l'instant t (the internal overpressure at the time t).
- St est la vitesse de flamme turbulente.
- $Q_{fl}(t)$ est le taux de production de volume en excès lié à la conversion des gaz frais en gaz brûlés.
- V est le volume d'enceinte.
- T est la température des gaz frais à l'instant t .
- $A_f(t)$ est la surface de flamme à l'instant t .
- γ est le ratio des capacités calorifiques.

Le confinement peut être ouvert à l'atmosphère à travers des ouvertures permanentes ou créées par l'explosion si la pression interne, liée à la production de gaz brûlés dépasse la pression de rupture. Dans ce cas, une ouverture est progressivement créée par la poussée de la surface fragile hors de son point d'accroche. Le taux d'ouverture est limité par les effets d'inertie. Dans EFFEX, une équation prenant en compte la balistique est résolue afin de quantifier l'évolution temporelle de l'ouverture de la surface. Un paramètre clé pour quantifier les effets d'inertie est la surface massique de la surface fragile. Il peut être évalué comme le produit de la masse volumique de l'élément et de son épaisseur.

Lorsque le confinement est ouvert à l'atmosphère, le débit de fuite à l'extérieur est non nul et s'écrit :

$$Q_{fuite}(t) = -C_d \cdot A_s \cdot f[\Delta P(t)]$$

Où

- $Q_{fuite}(t)$ est le débit volumique à travers les orifices.
- C_d est le coefficient de décharge.
- A_s est la surface des orifices.
- $f[\Delta P(t)]$ est une fonction qui dépend de la différence entre la pression interne et la pression externe. Elle rend compte des effets de compressibilité de l'air. (Pour des faibles écarts de pression, $f[\Delta P(t)] = \sqrt{2 \cdot \sqrt{P/\rho}}$).

