RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
Liberté
Égalité
Fraternité

INERIS
maîtriser le risque pour un développement durable

ESSAIS VISANT À SIMULER UN FEU COUVANT DANS UN STOCKAGE DE PLUSIEURS CÉRÉALES & OLEAGINEUX
(MAÏS, BLÉ, ORGE, COLZA ET TOURNESOL)

OLIVIER GENTILHOMME (IDE/DIEM)

35ème journée du Groupe du RésoFeux, 10 & 11 juillet 2025, ASNR

La Rochelle, 2023

Contexte/objectifs

Retour d'expérience :

- Nombreux feux de silos chaque année
- Principales origines identifiées : auto-échauffement ou point chaud dans la masse se traduisant par un feu à cœur (combustion lente)

Plusieurs questions [Veille accidentologique (COOP de France, Intercéréales et Groupama)], dont :

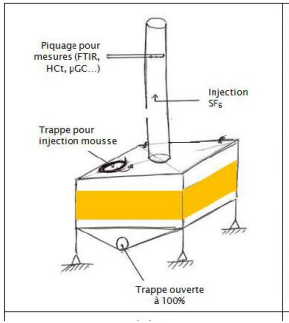
- Les gaz de pyrolyse peuvent-ils être à l'origine de la formation d'une atmosphère explosive dans le silo (fermé ou ventilé) ?
- L'injection d'azote est-elle efficace pour inerter le silo et/ou pour refroidir le stockage ?

Réalisation d'une campagne expérimentale pour adresser ces questions

Présentation du banc expérimental

Essais réalisés sur la plateforme incendie (PFI) de l'Ineris

Vue sur la galerie-incendie (50 m × 9,1 m^2)



Principales caractéristiques de la maquette silo :

- V = 1,7 m^3
- Cheminée (H = 1,74 m, Ø125 mm) avec 2 piquages (injection discontinue de SF_6 pour mesure du débit de gaz émis par le feu couvant + prélèvement pour mesure de la concentration des gaz)
- Ventilation du stockage réalisée en ouvrant la trappe avant et en ajustant la ventilation dans la galerie pour que débit traversant le silo ~ débit nécessaire pour la mesure pour avoir un feu sous-ventilé (réalisé = 2 à 25% du débit nominal de fonctionnement)

Tests préliminaires du dispositif de chauffe #1

Résistance ~ 1,0 kW immergée dans un échantillon de maïs (L × l × H = 480 mm × 350 mm × 250 mm)

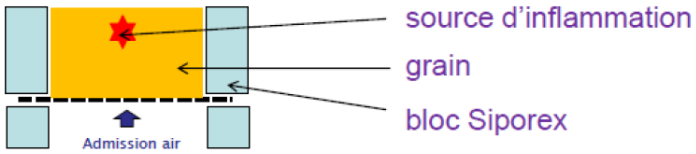
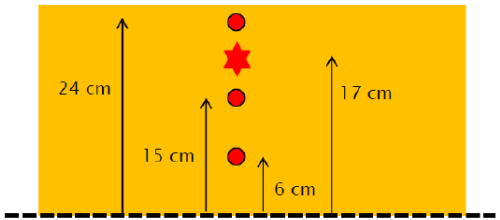
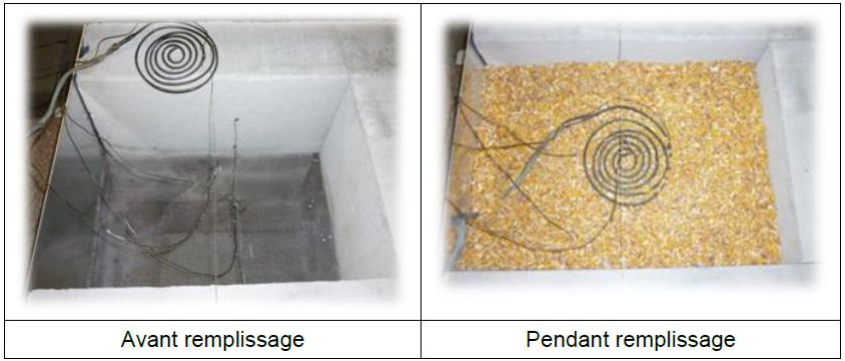


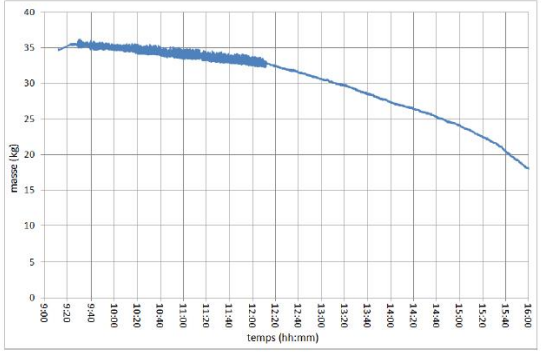
Figure 1. Schéma du banc expérimental pour le test préliminaire



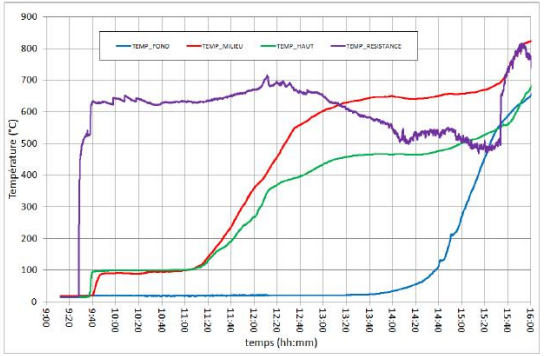


Avant remplissage	Pendant remplissage

Tests préliminaires du dispositif de chauffe #2



Evolution de la pesée au cours du temps



Evolution des températures au cours du temps

A t_0 + 45 min

A t_0 + 2 h

A t_0 + 6 h

Le lendemain du test

Phase 1 (**séchage du maïs**) durant 1h20min : fumées blanches + pesée (relativement bruitée) varie peu + températures proches de 100°C + gonflement sur la partie supérieure

→ perte de masse ~ 0,25 g/s

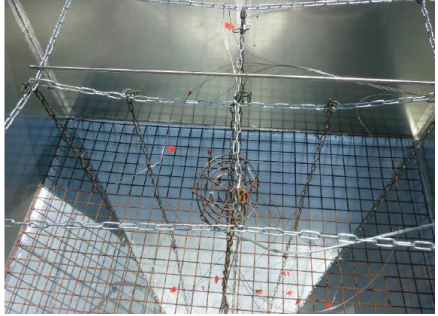
Phase 2 (**feu couvant**) durant 4h30min : fumées plus importantes et bleutées + pesée (non bruitée) varie plus + températures augmentant jusqu'à 600°C

→ perte de masse ~ 0,74 g/s

Phase 3 (**feu de surface**) : flammes vives + températures supérieures à 600°C

→ perte de masse ~ 60 g/s

Ici : seulement 42 L d'échantillon et bonnes conditions de ventilation



Focus sur la métrologie

Pour la détermination de la vitesse de combustion de l'échantillon :

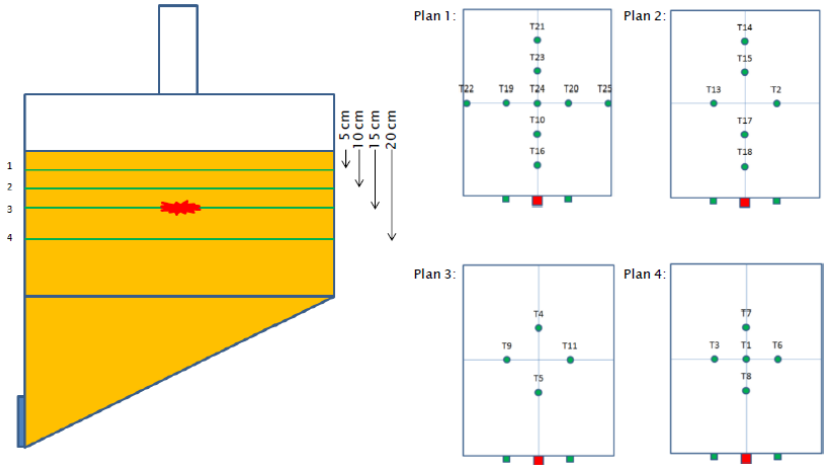
- Balance pour mesurer la masse de (silo + stockage)

Pour l'analyse des gaz émis :

- Paramagnétique (O_2)
- µ-GC (O_2, N_2 et H_2)
- FTIR (CO, CO_2, CH_2, C_2H_2 et SF_6)
- HCt (hydrocarbures totaux)
- Analyse FID (CH_4) pour le test avec tournesol

Pour apprécier la propagation de l'onde de chaleur :

- 24 thermocouples type K dans la masse du grain



Exemple pour le maïs

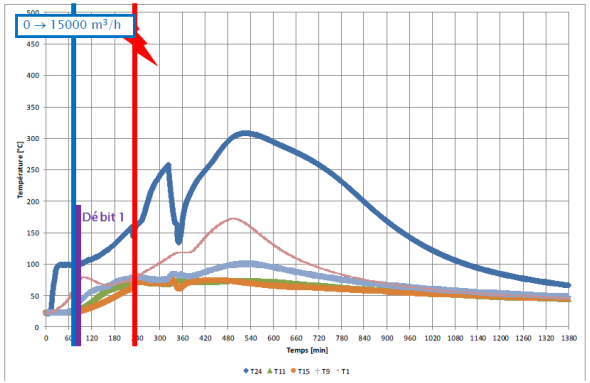
Présentation des résultats pour le maïs

T_0 = 9h 48min 07s	Mise en route de la résistance et régulation à 500°C
T_0 + 20min	Chauffe à 550°C
T_0 + 40min	Chauffe à 600°C
T_0 + 1h	Chauffe à 620°C
T_0 + 1h 20min	Chauffe à 640°C
T_0 + 1h 23min	Mise en route de la ventilation dans la galerie-incendie à 15000 m^3/h
T_0 + 1h 30min	Injection de SF_6 dilué dans l'azote pour mesurer le débit passant dans la maquette. **Le débit était alors de 1400 NL/h.**
T_0 + 1h 47min	Arrêt de l'injection en SF_6 mais injection maintenue en azote pour purger la ligne de toute trace de SF_6.
T_0 + 1h 53min 30s	Arrêt de l'injection en azote
T_0 + 3h 47min	Injection d'azote pendant quelques minutes dans le ciel gazeux de la maquette pour essayer de résoudre le problème de fluctuation des concentrations
T_0 + 4h	Arrêt intempestif de la résistance
T_0 + 5h 25min	Injection d'azote dans le ciel gazeux du silo
T_0 + 6h	Arrêt de l'injection d'azote

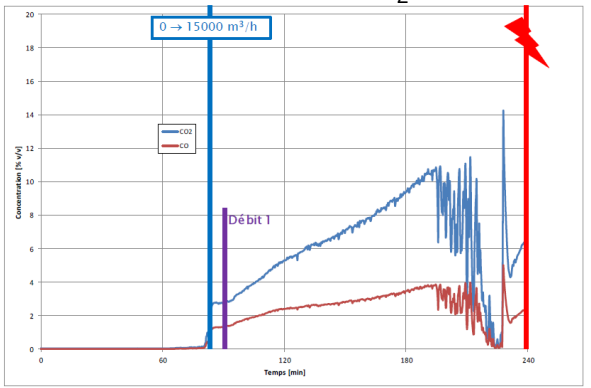
Présentation des résultats pour le maïs

T_0 = 9h 48min 07s	Mise en route de la résistance et régulation à 500°C
T_0 + 20min	Chauffe à 550°C
T_0 + 40min	Chauffe à 600°C
T_0 + 1h	Chauffe à 620°C
T_0 + 1h 20min	Chauffe à 640°C
T_0 + 1h 23min	Mise en route de la ventilation dans la galerie-incendie à 15000 m^3/h
T_0 + 1h 30min	Injection de SF_6 dilué dans l'azote pour mesurer le débit passant dans la maquette. **Le débit était alors de 1400 NL/h.**
T_0 + 1h 47min	Arrêt de l'injection en SF_6 mais injection maintenue en azote pour purger la ligne de toute trace de SF_6.
T_0 + 1h 53min 30s	Arrêt de l'injection en azote
T_0 + 3h 47min	Injection d'azote pendant quelques minutes dans le ciel gazeux de la maquette pour essayer de résoudre le problème de fluctuation des concentrations
T_0 + 4h	Arrêt intempestif de la résistance
T_0 + 5h 25min	Injection d'azote dans le ciel gazeux du silo
T_0 + 6h	Arrêt de l'injection d'azote

Température mesurée



Concentration en CO et CO_2

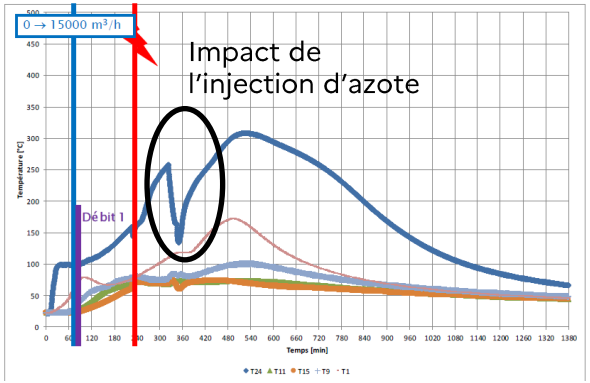


T ∈ [0 : 80 min] : sans ventilation dans la galerie → séchage du maïs
T ∈ [80 : 190 min] : avec ventilation dans la galerie → augmentation des températures à la verticale de la source d'allumage + augmentation du CO et CO_2
T > 190 min : fluctuation des concentrations CO et CO_2 et chute de celles-ci

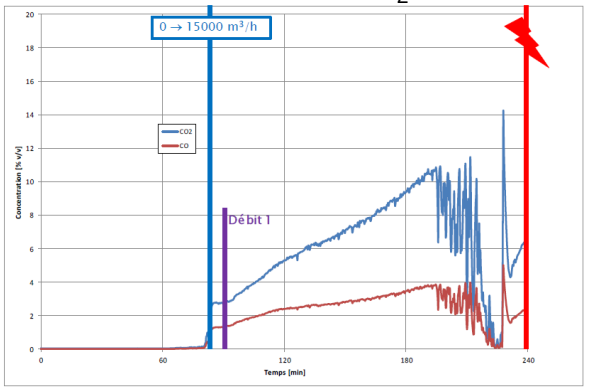
Présentation des résultats pour le maïs

T_0 = 9h 48min 07s	Mise en route de la résistance et régulation à 500°C
T_0 + 20min	Chauffe à 550°C
T_0 + 40min	Chauffe à 600°C
T_0 + 1h	Chauffe à 620°C
T_0 + 1h 20min	Chauffe à 640°C
T_0 + 1h 23min	Mise en route de la ventilation dans la galerie-incendie à 15000 m^3/h
T_0 + 1h 30min	Injection de SF_6 dilué dans l'azote pour mesurer le débit passant dans la maquette. **Le débit était alors de 1400 NL/h.**
T_0 + 1h 47min	Arrêt de l'injection en SF_6 mais injection maintenue en azote pour purger la ligne de toute trace de SF_6.
T_0 + 1h 53min 30s	Arrêt de l'injection en azote
T_0 + 3h 47min	Injection d'azote pendant quelques minutes dans le ciel gazeux de la maquette pour essayer de résoudre le problème de fluctuation des concentrations
T_0 + 4h	Arrêt intempestif de la résistance
T_0 + 5h 25min	Injection d'azote dans le ciel gazeux du silo
T_0 + 6h	Arrêt de l'injection d'azote

Température mesurée



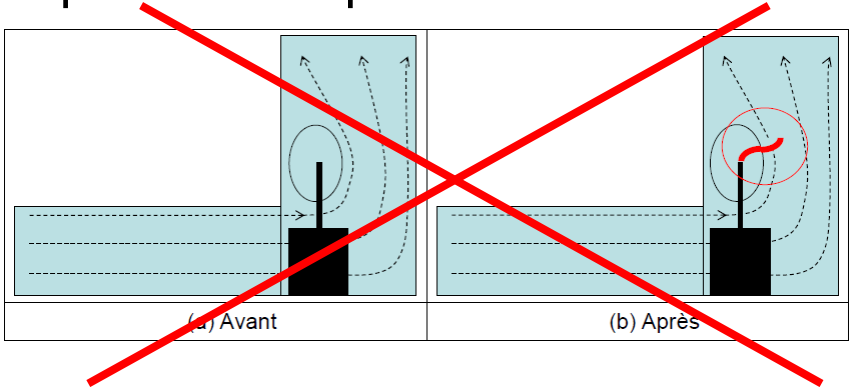
Concentration en CO et CO_2



Effet relativement limité de l'injection d'azote dans le temps et dans la masse

Présentation des résultats

Explication du phénomène de fluctuation de concentrations

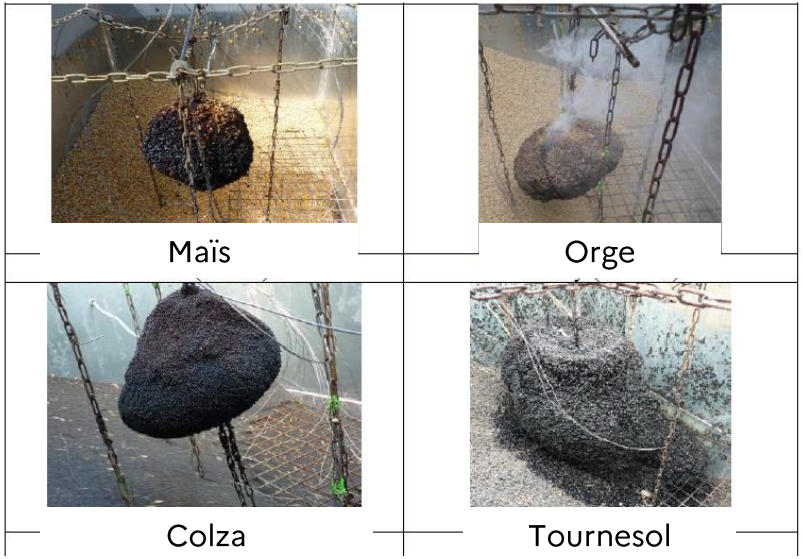


Essais sur le même grain avec et sans sortie déportée et toujours le même phénomène !

Formation d'un « rocher » carbonisé tout autour de la résistance → du fait de la ΔP ainsi générée, il est plus difficile pour l'air ambiant de venir oxygéner le feu déjà fortement sous-ventilé → la réaction finit par « mourir » sauf à réaugmenter la ventilation dans la galerie-incendie.

Présentation des résultats

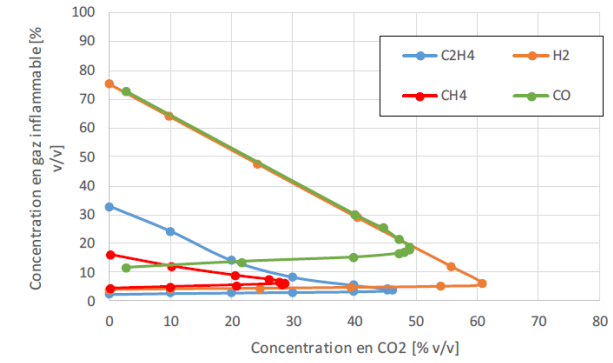
Forme des rochers pour les différents grains testés

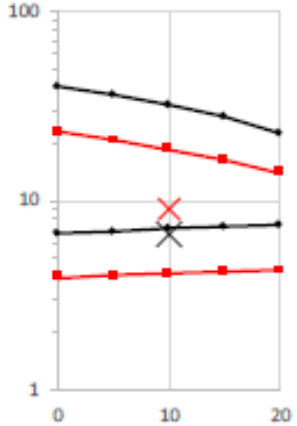


Présentation des résultats pour le maïs

Evaluation de la propension des gaz à former une ATEX

Grain	Maïs #1
Date essai	15/06/2015
Temps chauffe	4h (résist.)
Ventilation Galerie-incendie [m^3/h]	15000
Durée [min]	NA
Tirage [NL/h]	1400
Débit masse [g/s]	0,08
CO_2 [% v/v]	10
CO [% v/v]	4
H_2 [% v/v]	1
HCt [% v/v]	4
CH_4 [% v/v]	1,5
C_2H_4 [% v/v]	0,1





En noir : sans prise en compte du HCt

En rouge : HCt = propane

Mélange gazeux potentiellement explosif

Enseignements

Dans les conditions des essais:

- Les essais réalisés n'ont pas abouti à un feu à ciel ouvert mais à un assèchement du grain puis à un feu couvant. Ces phénomènes étant surtout localisés au niveau de la source de chaleur.
- Le feu couvant avait tendance à s'étouffer à cause, très probablement, de la formation d'un rocher de carbonisation tout autour du point chaud. Il était alors plus difficile pour l'air ambiant d'alimenter le feu couvant, le privant ainsi de son comburant.
- Par rapport à la gestion de crise sur un feu couvant survenant dans un silo :
  - Le fait d'augmenter la ventilation dans un silo peut raviver le feu couvant et augmenter les teneurs des gaz inflammables.
  - L'inertage a une influence relativement limitée, aussi bien dans le temps que dans l'espace.
  - Le risque d'inflammation du mélange gazeux formé en partie haute du silo ne peut être écarté.

Pour plus d'information :

GENTILHOMME O., TRUCHOT B., VERDIER F., POICHOTTE F. et BARRIER-GUILLOT B., « *Experimental investigation of a smouldering fire in an under-ventilated silo* », Process Safety Progress, vol. 38, n°2, novembre 2018