

Modélisation de feux de grands stockages

H.Y. WANG, P. JOULAIN et P. RUSSO

Points forts de nos activités de recherches

Propagation de la flamme de diffusion le long du combustible solide

Aspects chimiques, thermiques et dynamiques des fluides

1) **Phase solide** (pyrolyse endothermique, dégradation et oxydation exothermique)

processus de pyrolyse : $\dot{W}''' = A \exp(-E/RT)$

2) **Interface solide-fluide** (gazéification, convection, rayonnement, conduction)

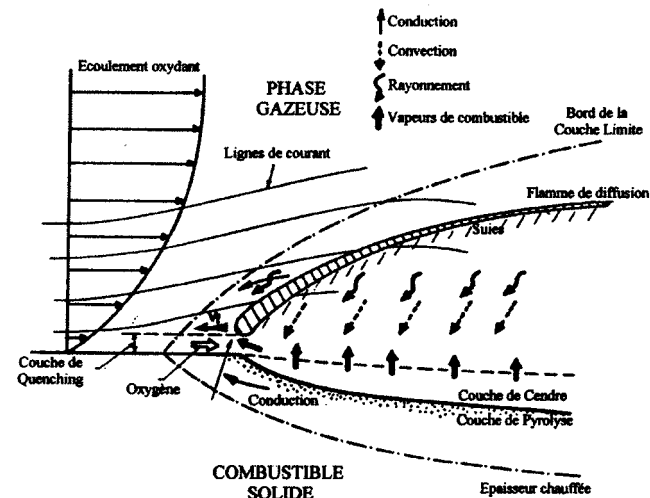
énergie de pyrolyse à l'interface

$$\dot{q}_{py}'' = \dot{q}_{cv}'' + \dot{q}_{rd}'' - \dot{q}_{cd}''$$

transfert de chaleur dans le solide

$$\rho_s c_s \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_s \frac{\partial^2 T_s}{\partial X^2}$$

3) **Phase gazeuse** (régime de l'écoulement réaction chimique, transport, suies)



Système d'équations pour un faible nombre de Mach

Conservation de la masse

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \rho = -\rho \nabla \cdot \mathbf{u}$$

Conservation de la quantité de mouvement

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla H = \mathbf{u} \times \boldsymbol{\omega} + \frac{1}{\rho} ((\rho - \rho_*) \mathbf{g} + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau})$$

Equation de la perturbation de pression totale

$$\nabla^2 H = \frac{\partial (\nabla \cdot \mathbf{u})}{\partial t} - \nabla \cdot \mathbf{F} \qquad \nabla H \approx \frac{1}{2} \nabla |\mathbf{u}|^2 + \frac{1}{\rho} \nabla \tilde{p}$$

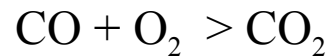
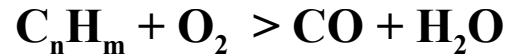
Expression thermodynamique de la divergence

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = \frac{\gamma - 1}{\gamma p_0} \left(\dot{q}_c'' + \nabla \cdot \lambda \nabla T + \nabla \cdot \sum_{i=0}^N c_{p,i} T \rho D_i \nabla Y_i - \nabla \cdot \mathbf{q}_r \right) - \frac{1}{\gamma p_0} \frac{dp_0}{dt}$$

Equation d'état

$$p_0(t) = \frac{\gamma - 1}{\gamma} \rho h$$

Modèle de combustion à deux étapes réactionnelles



Approche Eddy-Break Up (EBU)

$$\frac{\partial \rho Y_1}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \rho Y_1 = -\rho Y_1 \nabla \cdot \mathbf{u} + \nabla \cdot (\rho D_1) \nabla Y_1 + \dot{W}_1'''$$

$$\dot{q}_c''' = -\Delta H_c \dot{\omega}_f$$

Modèle de suies (approche de Moss et de Magussen)

$$\frac{\partial (\rho u n)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho v n)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_n} \frac{\partial n}{\partial y} \right) + W_{n,\text{form}}''' - W_{n,\text{oxyd}}'''$$

$$\frac{\partial (\rho u c_s)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho v c_s)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_s} \frac{\partial c_s}{\partial y} \right) + W_{\text{form}}''' - W_{\text{oxyd}}'''$$

Milieu semi-transparent fluide émettant-absorbant

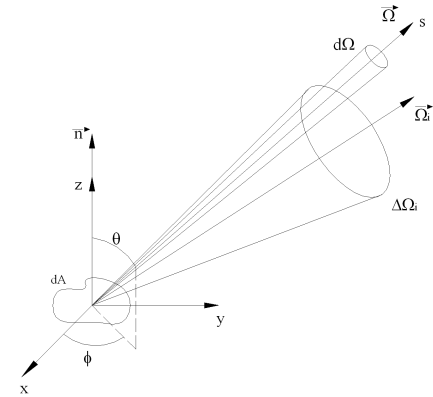
$$\mathbf{s} \cdot \nabla I_n(\mathbf{x}, \mathbf{s}) = \kappa_n(\mathbf{x}) [I_{b,n}(\mathbf{x}) - I(\mathbf{x}, \mathbf{s})]$$

Conditions limites à la paroi grise

$$I_w(\mathbf{s}) = \varepsilon_w I_{bw} + \frac{1 - \varepsilon_w}{\pi} \int_{\mathbf{s}' \cdot \mathbf{n}_w < 0} I_w(\mathbf{s}') |\mathbf{s}' \cdot \mathbf{n}_w| d\Omega$$

Divergence du flux radiatif

$$-\nabla \cdot \mathbf{q}_r(\mathbf{x}) = \kappa(\mathbf{x}) [U(\mathbf{x}) - 4\pi I_b(\mathbf{x})] \quad \text{avec} \quad U(\mathbf{x}) = \int_{4\pi} I(\mathbf{x}, \mathbf{s}) d\Omega$$



Ordonnées discrètes adaptées aux volumes finis

$$\sum_{m=1}^6 A_m I_m \int_{\Omega^1} (\mathbf{s} \cdot \mathbf{n}_m) d\Omega = \kappa_{ijk} [I_{b,ijk} - I_{ijk}^1] V_{ijk} \delta \Omega^1$$

Simulation Numérique des Grandes Echelles (LES-FDS)

séparation des échelles

$$\phi = \hat{\phi} + \phi''$$

partie filtrée

$$\hat{\phi}(\mathbf{x}, t) = \int_{\Omega} G(\mathbf{x} - \mathbf{x}', \Delta) \phi(\mathbf{x}', t) d\mathbf{x}'$$

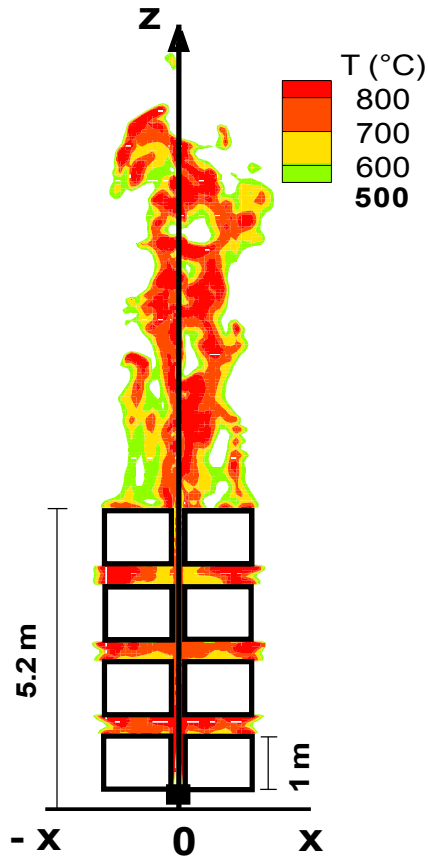
tenseur sous-maille (Smagorinsky)

$$\hat{\tau}_t = \mu_t \left(2 \text{def } \hat{\mathbf{u}} - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \hat{\mathbf{u}}) \mathbf{I} \right)$$

viscosité turbulente

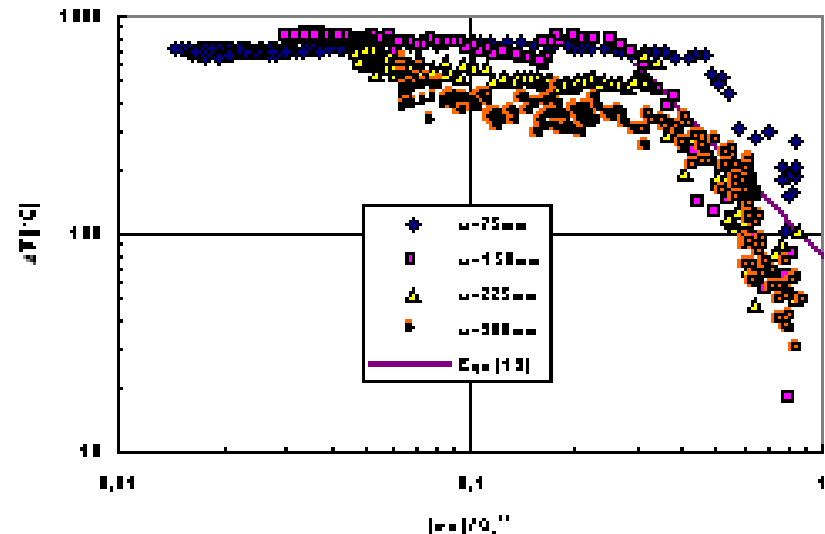
$$\mu_t = \rho (C_S \Delta)^2 |S|$$

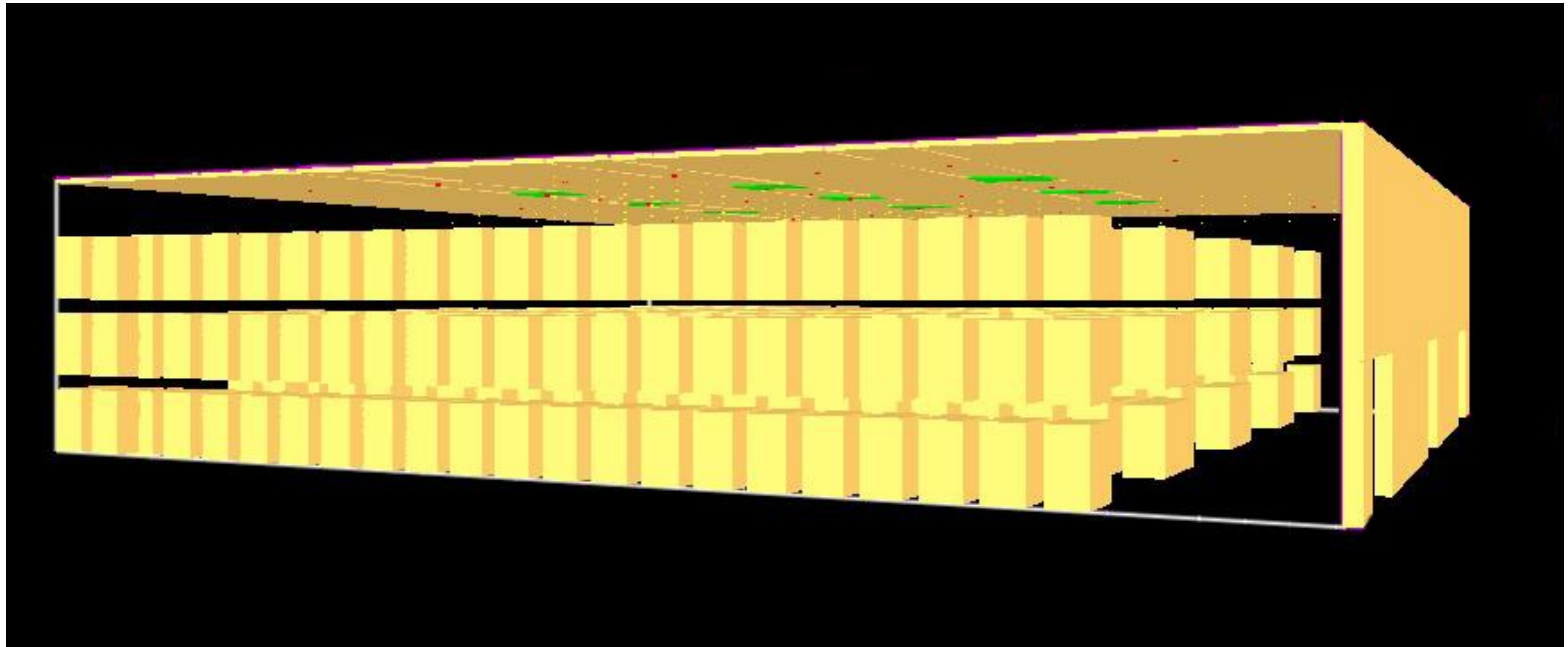
Objectif : Détermination de la vitesse de propagation de flamme le long des combustibles solides pour assurer la sûreté des entrepôts



Corrélation expérimentale

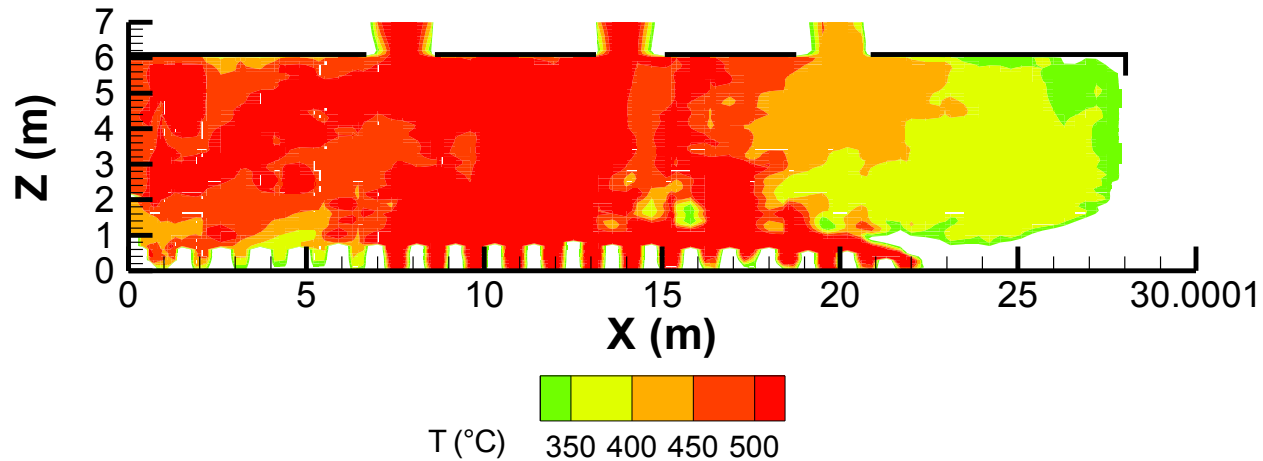
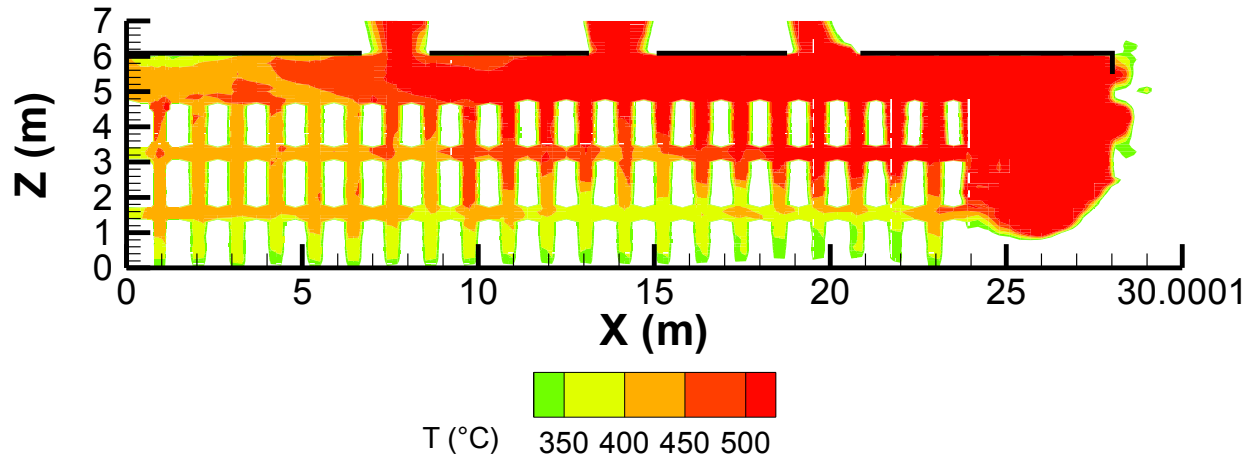
$$\Delta T = 28 \left[\frac{T_{\infty}}{g c_p^2 \rho_{\infty}^2} \right]^{1/3} \frac{Q_c^{2/3}}{(z - z_0)^{5/3}}$$





- **Phénomène de flashover**
- **Oscillation de la flamme**
- **Extinction naturelle de la flamme**

FEUX D'ENTREPÔT



Applications futures

- 1) **Caractérisation des feux couvants, des fumées, combustion du solide ou liquide**
- 2) **Extinction de la flamme de diffusion par brouillard d'eau
Extinction des feux en aéronautique par dilution et soufflage
à l'aide de générateur de gaz**