

**Interactions turbulence-combustion lors des explosions  
de mélanges hybrides vapeurs/poussières -  
Combustion-turbulence interactions in hybrid mixtures  
flames**

Khalili Imad, Dufaud Olivier, Perrin Laurent, Nicolas Cuervo, Laurent André

► **To cite this version:**

Khalili Imad, Dufaud Olivier, Perrin Laurent, Nicolas Cuervo, Laurent André. Interactions turbulence-combustion lors des explosions de mélanges hybrides vapeurs/poussières - Combustion-turbulence interactions in hybrid mixtures flames. Récents Progrès en Génie des Procédés, 2011, pp.1-6. hal-01925947

**HAL Id: hal-01925947**

**<https://hal.univ-lorraine.fr/hal-01925947>**

Submitted on 18 Nov 2018

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

## **Interactions turbulence-combustion lors des explosions de mélanges hybrides vapeurs/poussières**

### **Combustion-turbulence interactions in hybrid mixtures flames**

KHALILI Imad<sup>a\*</sup>, DUFAUD Olivier<sup>a</sup>, PERRIN Laurent<sup>a</sup>, Nicolas CUERVO<sup>a</sup> et LAURENT André<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Laboratoire Réactions et Génie des Procédés, Nancy-Université, CNRS, ENSIC/INPL  
1 Rue Grandville BP 20451 F-54001 Nancy Cedex

#### **Résumé**

De nombreuses études ont été entreprises sur les explosions de poussière alors que les travaux concernant les explosions de mélanges solide/gaz ou vapeur (mélanges hybrides) sont plus rares. Nos expériences ont montré d'une part que l'explosion d'un mélange hybride est possible même quand la concentration en poudre et la concentration en vapeur sont respectivement inférieures à la concentration minimale explosive (CME) et à la limite inférieure explosive (LIE), et d'autre part, que les mélanges hybrides peuvent avoir une sensibilité à l'inflammation très élevée comparée à celle de la poussière seule. De même la sévérité des explosions peut être exacerbée en présence de mélanges hybrides en particulier pour ce qui est de la vitesse maximale d'accroissement de la pression.

Si la détermination des paramètres de sévérité reste empirique et imprécise, une autre approche plus fondamentale basée sur l'analyse des vitesses de flamme est néanmoins possible. Les effets de la courbure et de l'éirement sur la structure du front de flamme, et donc sur sa vitesse de propagation, ont été étudiés expérimentalement en exploitant les images obtenues à l'aide d'une caméra à haute définition. Deux grandeurs caractéristiques des mélanges méthane/amidon et hexane/tournesol ont donc été déterminées :  $S_u^\circ$ , la vitesse fondamentale à étirement nul (comprise entre 22 et 36 cm.s<sup>-1</sup>) et  $\mathcal{L}$ , la longueur de Markstein (entre 0,2 et 1,9 mm). Ces tests permettent de comparer les stabilités des flammes de mélanges hybrides par rapport à celles des composés purs et démontrent leur comportement particulier. Ils soulignent aussi la nécessité d'utiliser des moyens de prévention et de protection spécifiques pour ce type de mélanges et de les dimensionner.

**Mots-clés : Mélange hybride, explosions de poussières, étirement, longueur de Markstein.**

#### **Abstract**

Gas/dust explosions have been studied for years, but very few researches have been carried out on the hydrodynamic behavior of such flames. However, recently, the specific behaviors of such mixtures as regard to their ignition sensitivity and explosion severity have been demonstrated. Experiments have shown that concentration of gas/vapours as low as 1% vol. causes a significant decrease of the minimum ignition energy and induces changes in the rate-limiting step of the combustion reaction. They also confirmed that a hybrid mixture explosion is possible even when both dust and vapour concentrations are respectively lower than their minimum explosion concentration and lower explosivity limit. Addition of small amounts of gaseous compounds has also a strong effect on the explosion severity and could lead to explosivities of hybrid mixtures, which could be greater than those of the pure compounds themselves.

This work also focuses on the effect of combustion/turbulence interactions on the flame propagation in hybrid mixtures. As regard to gaseous mixtures, the presence of particles strongly modifies the turbulence level, bringing new hydrodynamic instabilities. The impact of flame stretching on the flame velocity has also been studied. Two parameters of hybrid mixtures methane/wheat starch and hexane/sunflower oilcakes have notably been determined for:  $S_u^\circ$ , the fundamental unstretched burning velocity (ranging between 22 and 36 cm.s<sup>-1</sup>) and  $\mathcal{L}$ , the Markstein length (from 0.2 to 1.9 mm). This study allows the determination of specific means of prevention and protection for such mixtures.

**Keywords: Hybrids mixtures, dusts explosions, flame stretching, Markstein length.**

## 1. Introduction

L'évaluation du risque d'explosion des nuages de poussières combustibles nécessite la connaissance préalable de leurs caractéristiques de sensibilité à l'ignition et de sévérité. Elles dépendent de nombreux paramètres dont, entre autres, la composition chimique du matériau, la granulométrie, la richesse et la turbulence du mélange combustible – comburant (Eckhoff, 2003). La situation se complique lors de la prise en compte d'un nuage comportant conjointement une poussière inflammable, un gaz ou une vapeur combustible et un comburant. Ces mélanges dits hybrides sont notamment rencontrés dans les industries alimentaires (poussières de céréales et gaz de fermentation ; poussières de tourteaux et vapeur de solvant...) et les industries pharmaceutiques (excipients et solvants). Ils constituent un domaine encore insuffisamment exploré. Pourtant le risque d'explosion des mélanges hybrides est important, tant par leur probabilité d'occurrence que par leur gravité. Lors de l'évaluation des risques et en particulier lors de l'application des directives ATEX, visant à améliorer la sécurité des travailleurs en présence d'atmosphères explosives, le cas des mélanges hybrides n'est souvent pas apprécié à sa juste valeur. D'une part, lorsque la teneur en gaz ou de vapeur est faible, c'est-à-dire inférieure à la limite inférieure d'explosivité (LIE), son influence ne devrait pas être négligée. D'autre part, lorsque la concentration de poussière est inférieure à la concentration minimale d'explosion (CME), l'analyse considérant la seule présence du gaz n'est pas satisfaisante. En effet quelques études (Bartknecht, 1989 ; Nifuku et al. 2006 ; Dufaud et al. 2008) ont démontré la spécificité des explosions de mélanges hybrides solide/gaz ou vapeur par rapport aux explosions soit de gaz ou de vapeur seul, soit de solide seul.

Le but de cet article est de déterminer ces caractéristiques spécifiques afin de mieux comprendre les comportements explosifs des mélanges hybrides vapeur/poussières et gaz/poussières. Durant ce travail de recherche, l'étude s'est focalisée sur des composés organiques. Dans une première étape les caractéristiques de la sensibilité à l'ignition (notamment l'Energie Minimale d'Inflammation) et de la sévérité d'explosion (pression d'explosion et vitesse de montée en pression) des mélanges hybrides ont été déterminées expérimentalement. Ensuite la mise en œuvre d'une technique de mesure de la vitesse de flamme a permis d'examiner les mécanismes de propagation et d'accélération d'une flamme se propageant à travers des mélanges hybrides.

## 2. Dispositif expérimental et méthodes

### 2.1 Poudres et leurs préparations

Les tests ont été effectués sur l'amidon de blé acheté chez Sigma Aldrich, tandis que les tourteaux de tournesol ont été fournis par la société Cooperl. La distribution granulométrique des échantillons a été déterminée par granulométrie à diffraction laser (Malvern). Les échantillons ont été caractérisés par les diamètres moyens en volume  $d_{10}$ ,  $d_{50}$  et  $d_{90}$ , soit [16 ; 35 ; 76  $\mu\text{m}$ ] et [23, 132, 431  $\mu\text{m}$ ] respectivement pour l'amidon de blé et les tourteaux. Pour éviter l'effet de l'humidité, les échantillons ont été systématiquement séchés pendant deux heures à 50 ° C sous vide dynamique.

### 2.2 Détermination de l'Energie Minimale d'Inflammation

L'influence de l'addition de petites quantités de gaz ou de vapeur combustible sur la sensibilité de la poussière à l'inflammation a été étudiée en utilisant un tube de Hartmann (Mike 3 - Kühner AG) initialement conçu pour les poussières selon la norme EN 13821:2002. Cet appareil a été modifié afin de permettre la détermination de l'énergie minimale d'inflammation (EMI) de mélanges hybrides.

### 2.3 Mesure des caractéristiques de sévérité

Tableau 1 : Caractéristiques de sévérité des combustibles purs

Combustibles	CME ( $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) / LIE (% v.)	$P_{\text{max}}$ (bars)	$dP/dt_{\text{max}}$ ( $\text{bar}\cdot\text{s}^{-1}$ )	$K_{st/g}$ ( $\text{bar}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )
Tourteaux de tournesol	40	7,4	452	123
Amidon de blé	150	8,8	397	108
Hexane	0,3	8,3	1182	321
Méthane	4,8	8,2	1802	489

Les mesures de la surpression maximale d'explosion  $P_{max}$ , de la vitesse maximale de montée en pression ( $dP/dt_{max}$ ) et de la concentration minimale explosive (CME) des combustibles ont été conduites dans une sphère d'explosion de 20 L (Kühner AG) normalisée (ISO 6184/1). Le tableau 1 regroupe les caractéristiques propres de sévérité de chacun des constituants des mélanges étudiés afin de définir une référence de comparaison.

#### 2.4 Mesure et calcul de la vitesse fondamentale de flamme à étirement nul

La propagation de la flamme a été étudiée à l'aide d'une enceinte d'expérimentation constituée d'un tube sous vide étanche de format parallélépipède, de section droite carrée, de volume  $V= 4,9$  L, de longueur  $L=100$  cm et de côté  $D= 7$ cm, soit un rapport d'allongement  $L/D$  d'environ 14 (Figure1). Le tube est fermé à l'extrémité de l'allumage et équipé d'une soupape de sécurité à l'autre extrémité. Comme deux des faces opposées du tube sont en verre (les deux autres étant en acier inoxydable), il est possible de suivre visuellement le processus de propagation de la flamme à l'aide d'une caméra vidéo à haute vitesse à 10000 images par secondes. Le système d'allumage est constitué de deux électrodes de l'appareil Mike 3. Ces électrodes ont été positionnées au milieu de l'enceinte à 11 cm au-dessus de l'extrémité inférieure du tube. La mise en suspension des poussières se fait par le système de génération de suspension du Mike 3. Le dispositif expérimental comprend aussi un système d'injection de vapeurs et de gaz permanents.

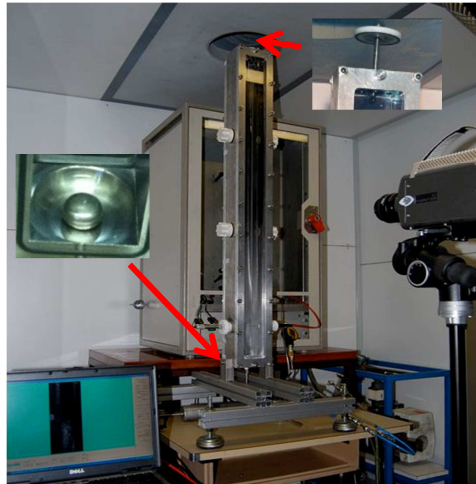


Figure 1. Dispositif expérimental de visualisation de propagation de flammes

La position du front de flamme est déterminée par traitement numérique des vidéos. Elle permet de déterminer la vitesse spatiale de propagation du front de flamme. Selon Andrews et Bradley (1972) la relation entre la vitesse spatiale de la flamme  $S_s$  et la vitesse de combustion  $S_u$  peut être exprimée comme suit en fonction de la surface du front de flamme  $A_f$  et de la surface de la section droite du tube  $A$ .

$$S_u = S_s \frac{A}{A_f} \quad (1)$$

Afin d'évaluer la valeur de  $A_f$ , la surface du front de flamme peut être considérée comme celle d'un paraboloïde de révolution allongé. La vitesse  $S_u$  a été corrigée en tenant compte du facteur d'expansion thermique  $\alpha$  entre les gaz chauds issus de la combustion et les gaz frais initiaux. Le facteur d'expansion est défini par le rapport entre la masse volumique des réactifs frais  $\rho_u$  et celle des produits brûlés  $\rho_b$ . Il a été estimé à l'aide des températures adiabatiques de flamme calculées par le logiciel CEA (Gordon et McBride, 1994).

$$S_u = \frac{S_s}{\alpha} \frac{A}{A_f} \text{ avec } \alpha = \frac{\rho_u}{\rho_b} \quad (2)$$

Plusieurs facteurs influencent la vitesse de combustion comme entre autres la composition du mélange, la pression, la température et la turbulence. L'effet de ce dernier facteur se traduit par la prise en compte d'un terme appelé « étirement ». Il s'agit de l'augmentation de la surface de flamme lorsque le front est soumis à une perturbation dans l'écoulement. Par définition, le taux d'étirement  $K$  s'écrit (Law, 2006):

$$K = \frac{1}{A_f} \frac{dA_f}{dt} \quad (3)$$

Markstein (1964) et Clavin (1985) ont établi une relation linéaire entre la vitesse fondamentale de flamme à étirement non nul  $S_u$  et le taux d'étirement  $K$  :

$$S_u = -\mathcal{L} K + S_u^0 \quad (4)$$

$S_u^0$  est la vitesse fondamentale à étirement nul. L'évaluation de la pente de la variation de la vitesse  $S_u$  en fonction du taux d'étirement  $K$  donne la longueur de Markstein  $\mathcal{L}$  (figure 4).

### 3. Résultats et discussion

#### 3.1 Sensibilité à l'inflammation des mélanges hybrides

La figure 2 résume les résultats des expériences effectuées sur les mélanges hybrides tourteaux de tournesol / hexane et amidon / hexane dans l'air. Une diminution significative de l'EMI est obtenue dès la présence d'une faible concentration en hexane de l'ordre de 1% vol. Par exemple, pour l'échantillon d'amidon, l'EMI chute de 67 mJ pour la poussière pure à 4 mJ alors que seulement 1% vol. d'hexane est ajouté. Ces résultats corroborent ceux trouvés par Franke (1978).

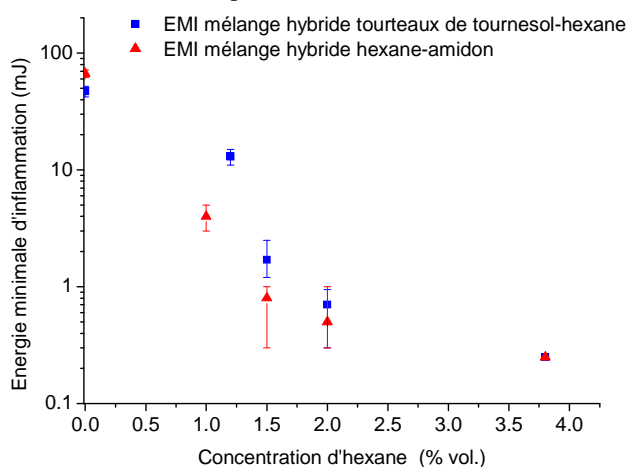


Figure 2. Evolution des énergies minimale d'inflammation des mélanges hybrides tourteaux de tournesol/hexane et de l'amidon/hexane en fonction de la concentration de vapeur.

L'application de modèles de combustion à cœur rétrécissant suggère que l'une des hypothèses susceptible d'expliquer le comportement spécifique de ces mélanges hybrides pourrait être la modification de l'étape déterminante de la réaction de combustion, résultant d'un changement d'une réaction contrôlée par la diffusion à une réaction en phase gazeuse homogène. Nos expériences ont également confirmés qu'une explosion de mélanges hybrides est possible lorsque les concentrations en gaz/vapeurs et en poussières sont respectivement inférieures à la limite inférieure d'explosivité et à la concentration minimale explosive. Des comparaisons ont été faites avec les modèles de Bartknecht et Le Chatelier (Bartknecht, 1989). Il apparaît que ces lois ne sont pas suffisamment restrictives en termes de sécurité. Des modèles simples intégrant le diamètre critique des noyaux de flamme et la température adiabatique de flamme ont été testés avec succès afin de représenter la sensibilité à l'inflammation des ces composés.

#### 3.2 Sévérité d'explosion des mélanges hybrides

La figure 3a illustre l'influence de la présence du méthane sur la vitesse de montée en pression. Par exemple, pour une concentration de  $200 \text{ g.m}^{-3}$  d'amidon la vitesse de montée en pression est de  $31 \text{ bar.s}^{-1}$  en l'absence de méthane, alors qu'avec une concentration de 2% en méthane elle croit jusqu'à  $300 \text{ bar.s}^{-1}$ . Le même phénomène est observé sur la figure 3b pour un mélange hexane - tourteaux de tournesol. Il faut aussi noter que la concentration en poussière pour laquelle la sévérité maximale est obtenue décroît nettement lors de l'ajout de quelques pourcents de solvants ou de gaz. Des tests conduits à richesse constante en mélanges hybrides ne conduisent néanmoins pas à des sévérités constantes : la concentration en combustible n'est évidemment pas le seul facteur influant. Pour des richesses inférieures à l'unité, l'addition de faibles quantités de combustible gazeux accroît donc la sévérité des explosions. Dans quelques cas particuliers, la sévérité de l'explosion peut être plus importante pour un mélange hybride

que pour le gaz ou la vapeur seule (Dufaud et al., 2009). C'est le cas pour le mélange hexane - tourteaux (figure 3b - tableau 1) contrairement au mélange méthane - amidon.

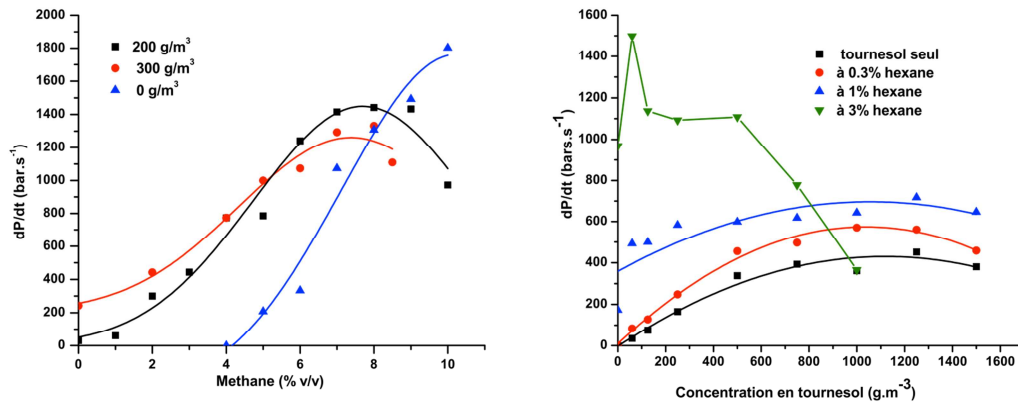


Figure 3. Vitesse maximale de montée en pression des mélanges hybrides tourteaux/hexane (droite – 3b) et amidon/méthane (gauche – 3a)

Ces indications concordent avec la tendance observée pour l'EMI (paragraphe 3.1). L'une des principales conclusions est que la présence de gaz ou de vapeur dans un nuage de poussière modifie la cinétique de combustion de poussière. Toutefois, cet effet n'est pas isolé et d'autres influences peuvent être mises en exergue. Ainsi, la présence de particules solides dans la zone de préchauffage située en amont des flammes modifie le flux thermique rayonné et influence probablement la vitesse de propagation de la flamme. Les interactions accrues entre les instabilités hydrodynamiques et la propagation des flammes dans les mélanges hybrides ne doivent également pas être négligées. Par rapport aux flammes de pré-mélanges gazeux, la présence de particules apporte une modification notable du champ de turbulence. Les paramètres de la turbulence dans les écoulements diphasiques gaz/solide sont alors différents de ceux existants dans les écoulements gazeux. L'étude des interactions turbulence-combustion a donc été entreprise (paragraphe 3.3).

### 3.3 La vitesse fondamentale de flamme à étirement nul

La figure 4 illustre l'évolution de la vitesse fondamentale de la flamme en fonction du taux d'étirement du front de flamme. Au début de la propagation de la flamme lorsque sa distance parcourue est faible, le taux d'étirement de sa surface est grand et la vitesse de propagation de la flamme est faible. On constate alors figure 4 que le taux d'étirement de la flamme diminue avec l'accroissement de la vitesse fondamentale. La vitesse fondamentale de flamme à étirement nul est obtenue en appliquant la relation (4).

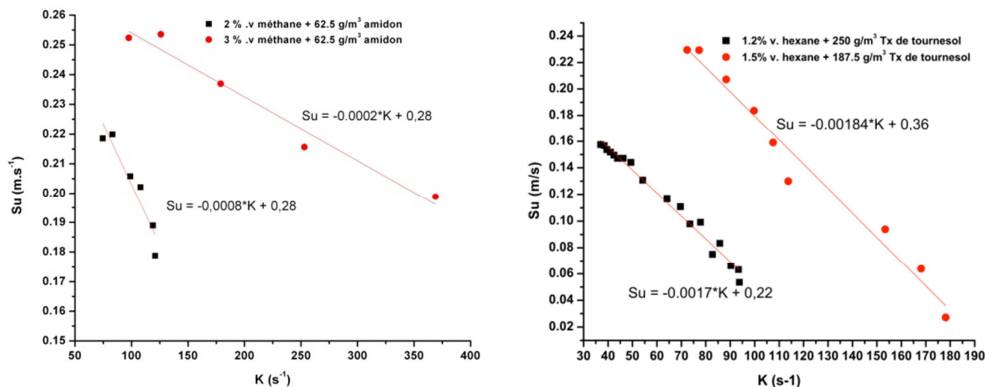


Figure 4. Evolution de la vitesse fondamentale de la flamme étirée en fonction de l'étirement pour des mélanges hybrides tourteaux de tourteaux/hexane (droite – 4b) et amidon/méthane (gauche – 4a).

Des vitesses de flamme à étirement nul de  $28 \text{ cm.s}^{-1}$  sont trouvées pour les mélanges de la figure 4a et de  $22$  à  $36 \text{ cm.s}^{-1}$  pour les mélanges avec l'hexane. Ces résultats sont cohérents avec les données de la

littérature proposant une vitesse fondamentale de combustion du méthane qui atteint au maximum  $36 \text{ cm.s}^{-1}$  pour une richesse unitaire et des vitesses fondamentales de l'ordre de  $38 \text{ cm.s}^{-1}$  pour l'hexane (Mannan et Lees, 2005). Ils sont également en accord avec les travaux de Proust (2004) et de Dahoe (Dahoe et al., 2002) donnant des vitesses laminaires de flamme à étirement nul comprises entre 15 et  $30 \text{ cm.s}^{-1}$  pour l'amidon seul. La longueur de Markstein est, elle aussi, spécifique à chaque mélange. Il faut d'abord souligner que les valeurs de  $\mathcal{L}$  sont certes faibles mais positives, ce qui conduit à des nombres de Lewis (ratio de la diffusivité thermique sur la diffusivité moléculaire) supérieurs à l'unité et, par conséquent, à une atténuation du plissement de la flamme et à sa stabilisation. Les ordres de grandeurs obtenus sont également cohérents avec les valeurs de 0,1 à 0,2 mm obtenues pour les mélanges air/méthane par Dahoe (Dahoe et al., 2002). L'apport de particules combustibles tend probablement à accroître  $\mathcal{L}$ , dont la valeur tend vers 8,5 ou 11 mm selon les références (Proust, 2004) (Dahoe et al., 2002). Ce paramètre doit être aussi comparé à l'épaisseur de flamme  $\delta$ . Les essais à richesse constante reproduits en figure 4b démontrent que ce seul paramètre ne permet pas de déterminer la stabilité de la flamme et que le ratio entre les concentrations de combustibles solides et gazeux est également un paramètre influent. L'analyse plus fine et systématique de ces données permettra de déterminer les conditions de déstabilisation et donc d'extinction de ces flammes de mélanges hybrides.

#### 4. Conclusion

Cette étude démontre le comportement spécifique des mélanges hybrides. La présence de gaz ou de vapeur dans le nuage d'une poussière combustible influence à la fois la sévérité d'explosion et la sensibilité à l'inflammation, même lorsque la concentration de vapeur ou de gaz est inférieure à sa LIE. La présence d'une faible concentration de gaz/vapeur, ici de l'ordre de 1% vol., peut conduire à un changement de l'étape déterminante de la réaction de combustion passant d'une limitation en régime de diffusion à une limitation réactionnelle ce qui implique une diminution drastique de l'EMI. Il a également été démontré que la présence simultanée des poudres et des vapeurs modifie la vitesse de la flamme qui devient beaucoup plus élevée que la vitesse de combustion de poussière pure. L'effet est principalement attribuable à une modification du processus de combustion mais aussi aux interactions turbulence-combustion ainsi qu'à la modification des modes de transfert thermique en amont du front de flamme.

#### Références

- Andrews, G.E. et Bradley, D., 1972, Determination of burning velocities: a critical review, *Combustion and Flame*, vol.18, 133-153.
- Bartknecht, W., 1989, *Dust Explosions: Course Prevention Protection*, Springer-Verlag Berlin and Heidelberg GmbH & Co. K.
- Clavin, P., 1985, Dynamic behavior of premixed flame fronts in laminar and turbulent flows, *Progress Energy Combustion Science* 11, 1-59.
- Dahoe, A.E., Hanjalic, K., Scarlett, B., 2002, Determination of the laminar burning velocity and the Markstein length of powder/air flames, *Powder Technology*, 122, 222-238.
- Dufaud, O., Perrin, L. et Traoré, M., 2008, Dust/vapour explosions: Hybrid behaviours?, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 21(4), 481-184
- Dufaud, O., Perrin, L., Traoré, M., Chazelet, S. et Thomas, D., 2009, Explosions of vapour/dust hybrid mixtures: A particular class, *Powder Technology*, 190, 269-273.
- Eckhoff, R.K., 2003, *Dust explosions in the process industries*, Gulf Professional Publishing.
- Franke, H., 1978, Bestimmung der Minderstzudenergie von Kohlenstaub/Methan/Luft Gemisches (hybride. Gemische), *VDI-Berichte*, 304, 69-72 (in german).
- Gordon, S. and McBride B.J., Computer program for calculation of complex chemical equilibrium compositions and applications, NASA RP 1311, 1994.
- Law, C., K., 2006, *Combustion physics*, Cambridge University Press.
- Mannan, S., Lees, F.P., 2005, *Lee's loss prevention in the process industries*, Elsevier.
- Markstein, G.H., 1964, *Nonsteady flame propagation*, Pergamon.
- Nifuku, M., Tsujita, H., Fujino, K., Takaichi, K., Barre, C., Paya, E. et al., 2006, Ignitability assessment of shredder dusts of refrigerator and the prevention of the dust explosion, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 19(2-3), 181-186.
- Proust, C., *Formation - Inflammation - Combustion des atmosphères explosives (ATEX) et effets associés*, 2004, HDR, INPL (in french).