



**HAL**  
open science

# Aspects fondamentaux de la propagation de flamme dans les mélanges air-poussière

Christophe Proust

► **To cite this version:**

Christophe Proust. Aspects fondamentaux de la propagation de flamme dans les mélanges air-poussière. Rapport Scientifique INERIS, 2007, 2006-2007, pp.64-66. ineris-01869092

**HAL Id: ineris-01869092**

**<https://hal-ineris.archives-ouvertes.fr/ineris-01869092>**

Submitted on 6 Sep 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.

# Aspects fondamentaux de la propagation de flamme dans les mélanges air-poussière

Christophe Proust

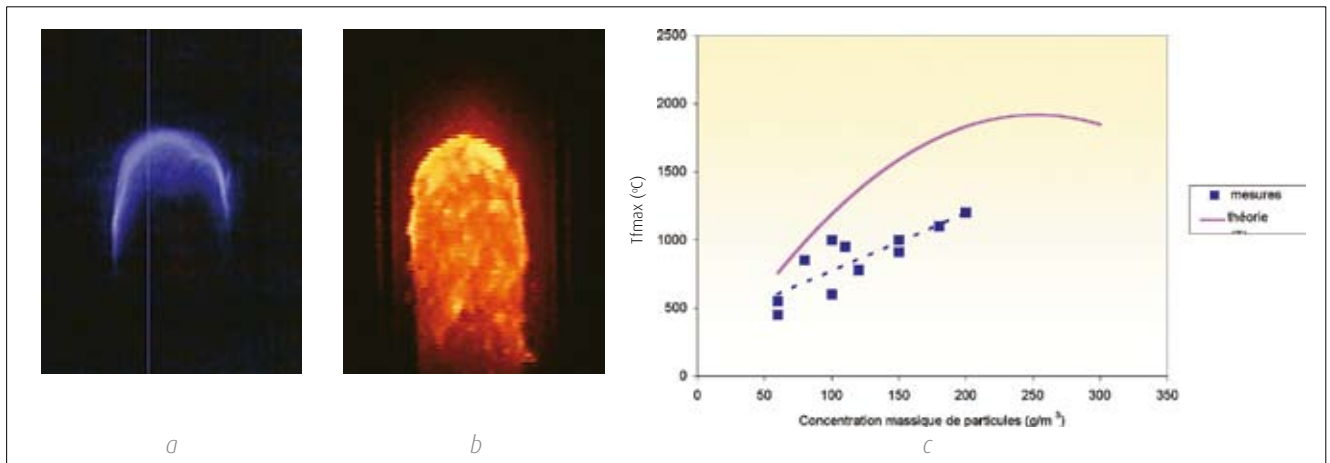
## CONTEXTE

L'histoire de l'industrialisation est ponctuée de nombreuses explosions de poussières accidentelles dont la fréquence et la sévérité se sont accrues en proportion du développement de l'industrie manufacturière [5]. Tout d'abord restreint au seul secteur minier, ce type d'accident s'est « propagé » à tous les secteurs de l'industrie : aujourd'hui, on admet assez facilement qu'il se produit une explosion de poussières par jour dans chaque pays industrialisé. Certaines explosions de poussières ont marqué les mémoires comme celle, dévastatrice, de l'installation de stockage céréalière de Blaye en 1997 [7]. Il est probable que l'ampleur des dégâts de ce type d'accident, associée à une plus forte demande sociale de sécurité, ait favorisé l'émergence d'une ingénierie de la sécurité dans laquelle la lutte contre l'explosion de poussières apparaît en bonne place.

Les effets d'une explosion (éclatement, projection de débris, émission d'une onde de pression aérienne...) sont la conséquence de la propagation d'une flamme autonome dans un nuage explosif qui transforme sur son passage des réactifs froids en produits de combustion chauds. L'expansion volumique associée est responsable de l'augmentation de pression. On parle d'explosion de poussières lorsque le mélange réactif est une suspension de particules combustibles dans l'air. En matière de sécurité, la compréhension de la manière dont la flamme se propage est une question centrale [9].

## DES CONCEPTS À EXAMINER

La plupart des concepts théoriques ont été obtenus pour des mélanges gazeux réactifs à partir de l'intuition de Mallard et le Châtelier [6] qui ont décrit la flamme comme une interface qui chauffe jusqu'à l'inflammation les réactifs par conduction thermique qui brûlent de telle manière que le taux de production de chaleur soit en équilibre avec le taux de transfert vers les réactifs. Non seulement ce type d'approche a permis de démontrer le caractère intrinsèque de la propagation d'une flamme dans un mélange non perturbé (flamme « laminaire ») mais il a mis en évidence que l'essentiel de la phénoménologie des flammes pouvait y être raccordé [2, 19]. Comparativement, la progression des connaissances relatives à la propagation des flammes de poussières est beaucoup plus récente [9] avec pour conséquence que nous n'en comprenons encore que quelques aspects. Il faut dire que l'expérimentation et la modélisation sont fortement compliquées par le caractère multiphasique des milieux considérés [5, 9]. En particulier, la question de la manière dont les particules brûlent reste ouverte [8, 11, 13, 14] : se transforment-elles en gaz avant la combustion ou la combustion se produit-elle à la surface des particules ? Le second point concerne le régime d'échange de chaleur entre les produits de combustion et les réactifs : on peut *a priori* admettre que la présence de petites particules solides dans les produits de combustion pourrait faire intervenir le rayonnement comme promoteur de la propagation. Dans cette situation, des régimes de propagation tout à fait inédits sont possibles conduisant, par exemple, à de brutales accélérations de la flamme. [1, 3, 4]



Les fronts de flammes non turbulentes dans un tube vertical de 10 cm de diamètre se propageant dans un prémélange air-méthane (a) et dans une suspension de particules d'amidon et d'air se ressemblent (b) - Un large écart entre la température théorique de flamme et les mesures est systématiquement observé (c).

1

## QUELQUES AVANCÉES SIGNIFICATIVES

Les résultats d'une étude expérimentale et théorique s'étalant sur presque deux décennies [8, 11, 13, 14, 18] suggèrent que les particules susceptibles de se gazéifier à basse température (moins de 1 000 °C par exemple) conduisent à un régime de propagation de flamme laminaire semblable à celui des flammes de mélanges gazeux (figures 1a et 1b). Il existe cependant des différences significatives comme, par exemple, une combustion quasi systématiquement incomplète (figure 1b).

Il semblerait que la grande majorité des poussières industrielles se trouve dans cette catégorie. Pour ces situations, il a également été montré que l'on peut, au moins en première approximation, utiliser la théorie des flammes de gaz y compris pour représenter les interactions avec l'environnement (dont la turbulence). Toutefois, quelques observations, pour l'heure incomplètes, suggèrent fortement que, pour d'autres poussières (celles qui se vaporisent à haute température comme la poudre d'aluminium, par exemple avec des résidus de combustion solides), le rayonnement thermique pourrait intervenir de façon déterminante dans le processus de propagation si bien que le régime de propagation de la flamme pourrait être différent.

Un exemple de propagation dans un nuage de particules d'aluminium et d'air amorcé à l'intérieur d'un tube vertical est présenté sur la figure 2a. On observe une flamme d'une luminosité extrême, tellement importante qu'il est difficile de distinguer précisément une zone de combustion même en utilisant des techniques de traitement d'image. L'instrumentation de ces flammes est encore difficile (températures très élevées, courts-circuits) mais les estimations théoriques montrent [13] que le flux de chaleur transmis par rayonnement serait dix fois plus grand que dans les flammes de poussières d'amidon (5 MW/m<sup>2</sup> dans le proche infrarouge). Nous avons simulé l'effet d'un tel flux sur un nuage de particules d'aluminium au moyen d'un faisceau laser infrarouge de 60 W et nous avons constaté (figure 2b) que le faisceau est capable de mettre à feu directement les particules et d'induire la combustion du nuage ce qui signifie que le rayonnement thermique pourrait être un mécanisme d'échange thermique important à travers le front de flamme. D'autres indices vont également dans ce sens, avec un comportement anormal de la flamme comme prévu par Cassel, comme, par exemple, une brutale accélération dès que la courbure du front diminue (c'est plutôt le contraire pour une flamme « traditionnelle »).

## RÉFÉRENCES

- [1] Blouquin R. (1996). « Contribution à l'étude théorique des interactions entre combustion et rayonnement », thèse de doctorat de l'Université de Poitiers, France.
- [2] Borghi R., Destrioux M. (1998). « Combustion and flame-chemical and physical principles », Edition TECHNIP.
- [3] Cassel H.M., Das Gupta A.K., Guruswamy S. (1937). « Factors affecting flame propagation through dust clouds », 3<sup>rd</sup> Symp. (int) on Combustion, pp. 185-189.
- [4] Cassel H.M., Liebman I., Mock W.K. (1956). « Radiative transfer in dust flames », 6<sup>th</sup> Symp. (int) on Combustion, pp. 602-605.
- [5] Eckhoff R.K. (1991). « Dust explosions in the process industries », Butterworth-Heinemann, Oxford.
- [6] Mallard E., Le Châtelier H. (1883). « Recherches expérimentales et théoriques sur la combustion des mélanges gazeux explosifs », *Ann. Mines*, vol. 8, p. 274.
- [7] Masson F. (1998). « Explosion d'un silo de céréales », Rapport de synthèse, INERIS EMA-FMS-98-21FP30-07/07/98.
- [8] Proust Ch. (1988). « Contribution à l'étude des mécanismes de propagation des flammes dans les mélanges hétérogènes gaz-particules solides », Thèse de doctorat n° 129, Université de Poitiers, France.
- [9] Proust Ch. (1999). « Explosions de poussières : études expérimentales des phénomènes et modélisation », Séminaire européen sur « Les explosions de poussières », Metz, Palais des Congrès, avril 1999.

2

Développement d'une flamme dans un mélange pauvre de particules d'aluminium et d'air (figure a : 100 g/m<sup>3</sup>; 20 ms entre images diamètre du tube = 10 cm)  
- amorçage direct de la réaction par un flux lumineux d'intensité comparable à celle émise par les produits de combustion (figure b).



a



b

#### RÉFÉRENCES

- [10]** Proust Ch. (2000). « Prévoir les effets des explosions de poussières sur l'environnement: EFFEX un outil de simulation », [www.ineris.fr](http://www.ineris.fr).
- [11]** Proust Ch. (2004). « Formation, inflammation, combustion des atmosphères explosives (ATEX) et effets associés », mémoire d'HdR présenté à l'Institut National Polytechnique de Lorraine, 12 février 2004.
- [12]** Proust Ch. (2005). "The usefulness of phenomenological tools to simulate the consequences of dust explosions: the experience of EFFEX", International ESMG Symposium on Process Safety and Industrial Explosion Protection, Nürnberg, Germany, 2005.
- [13]** Proust Ch. (2006a). "Flame propagation and combustion in some dust-air mixtures", *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 19.
- [14]** Proust Ch. (2006b). "A few fundamental aspects about ignition and flame propagation in dust clouds", *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 19.
- [15]** Proust Ch. (2006c). « Nanodust explosions. », ENERO Scientific workshop « Nanomaterials and nanoparticles. Risk management », 11 mai 2006, Bruxelles.
- [16]** Proust C., Leprette E., Daubech J., Sochet I. (2007). "The usefulness of phenomenological tools to simulate the consequences of dust explosions.", Proceedings of the 2007 AIChE spring national meeting, 3<sup>rd</sup> Global congress on process safety, 41<sup>st</sup> Loss prevention symposium, 22-27 April 2007, Houston, USA.
- [17]** Roux P., Proust Ch. (2003). « Méthode de protection contre les explosions: événements - explosions de poussières », Rapport final établi pour le compte du ministère de l'Écologie, du Développement et de l'Aménagement durables.
- [18]** Schneider H., Proust Ch. (2005). "Laminar and Turbulent Burning Velocities of Dust Clouds", International ESMG Symposium on Process Safety and Industrial Explosion Protection, Nürnberg, Germany, 2005.
- [19]** Williams F.A. (1985), "Combustion theory: 2<sup>nd</sup> edition", Benjamin/Cummings publishing company Inc., Amsterdam, ISBN 0-8053-9801-5.

#### POURQUOI POURSUIVRE ?

Il est certain qu'approfondir le travail accompli reste nécessaire même dans une perspective très appliquée. Pour ce qui concerne les mécanismes de propagation, par exemple, étudier spécifiquement le comportement des flammes dans les nuages de particules non vaporisables est absolument nécessaire, non seulement parce que cela concerne une fraction des poussières industrielles, mais aussi parce que l'effet devrait être d'autant plus marqué que

les particules sont fines, c'est-à-dire dans le contexte du développement des nanotechnologies <sup>[15]</sup>.

Mais, sans attendre ces résultats complémentaires, les données et les corrélations obtenues ont été intégrées dans un logiciel de simulation des explosions <sup>[10, 12, 16]</sup>, assez largement utilisé dans l'industrie, et servent aussi de base à l'élaboration de nouveaux guides de dimensionnement des systèmes de protection contre l'explosion <sup>[17]</sup>.

#### SUMMARY

#### FUNDAMENTAL ASPECTS OF FLAME PROPAGATION IN AIR-DUST MIXTURES

*The history of the development of the process industry has been punctuated by a number of hazardous explosions, sometimes very severe. A few of them are still in the memory and have certainly contributed to the birth of safety engineering. It has been known for more than a century that combustible dusts suspended in air have been partially responsible for such explosions but unlike gas explosions, the available knowledge and practices still seem to contain a significant part of empiricism. The work summarised in this article is an attempt to contribute to a better understanding of the explosion mechanisms of dust clouds. The core of the discussion pertains to basic flame propagation mechanisms. It has been discovered over two decades that for a number of combustible particles, the combustion processes in the flame show strong similarities to those of premixed gaseous flames. In particular, the propagation is driven by heat transfer through thermal conduction. However, for a class of particles, such as metal dust, thermal radiation may be strongly at work as well, modifying very significantly the propagation mechanisms in a way that has received little attention until now. This may appear as a burning question in the emerging world of "nanoparticles", since the smaller the particles the larger this influence...*