

Inflammation des nuages de poussières par des étincelles et des surfaces chauffées

Christophe Proust, Mohamed Boudalaa

► **To cite this version:**

Christophe Proust, Mohamed Boudalaa. Inflammation des nuages de poussières par des étincelles et des surfaces chauffées. 8. Congrès de la Société Française de Génie des Procédés (SFGP 2001), Oct 2001, Nancy, France. ineris-00972235

HAL Id: ineris-00972235

<https://hal-ineris.archives-ouvertes.fr/ineris-00972235>

Submitted on 3 Apr 2014

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.

INFLAMMATION DES NUAGES DE POUSSIÈRES PAR DES ÉTINCELLES ET DES SURFACES CHAUFFÉES

C. PROUST - M. BOUDALAA

INERIS-BP 2- F60550 Verneuil-en-Halatte

Résumé. Les trois types de sources d'inflammation, auxquelles cet article est consacré, sont les sources d'origine mécanique, les surfaces chauffées et les étincelles d'origine électrostatique. Ces catégories de sources seraient à l'origine des trois quarts des explosions de poussières répertoriées. L'approche retenue est essentiellement expérimentale. Pour produire les "points chauds", un faisceau laser (Nd-YAG) impactant une cible placée dans le nuage a été utilisé. Pour des délais d'inflammation relativement longs (1 à 2 mn), le paramètre caractéristique de l'inflammation est la puissance thermique fournie par la cible au mélange, du moins si la taille du point chaud est suffisamment petite (moins de 2 à 3 mm). Au delà de cette dimension, le paramètre d'inflammation serait plutôt une température critique du point chaud que l'on peut relier semble-t-il à la température "standard" d'inflammation du nuage considéré (four Godbert Greenwald). Pour les étincelles électrostatiques, des mesures de caractéristiques courant-tension ont été réalisées et quelques mesures de dimensions. La plupart des types possibles ont été examinés tels les décharges entre corps conducteurs (A), entre un corps conducteur et un corps isolant (B), entre un corps conducteur et un corps isolant doublé d'un conducteur relié à la terre (C). Il apparaît que les étincelles les plus puissantes (plusieurs joules) sont dans la pratique industrielle possibles dans le cas des déchargés de type A et C. Les mesures ont permis de constater que le rendement de conversion de l'énergie stockée sur le matériau en énergie électrique dans l'étincelle aux électrodes est très élevé. Enfin, une première approche d'examen du risque d'inflammation, lorsque le point chaud est créé pendant un laps de temps compatible avec un impact mécanique, a été tentée. On aboutit à un critère d'inflammation sous forme d'énergie. Cette énergie reste au moins supérieure de deux ordres de grandeur à l'énergie minimale d'inflammation par étincelle. Cette différence pourrait notamment provenir de l'absorption de chaleur par les corps solides.

INTRODUCTION

Parmi les moyens permettant de prévenir les explosions de poussières, la lutte contre les sources d'inflammation est, en pratique, un élément incontournable. Classiquement, on distingue [1], six catégories de causes d'inflammation connues: les frottements mécaniques, l'autoéchauffement, les flammes et surfaces chaudes, les étincelles électrostatiques, le matériel électrique et les travaux de mécano-soudage.

Les trois causes d'inflammation, frottements mécaniques, décharges d'électricité statique, et flammes/surfaces chaudes représentent environ les trois quarts des origines des accidents. Mettre en place une politique de prévention efficace suppose donc que l'on soit capable d'acquiescer une maîtrise suffisante des phénomènes responsables de ces causes d'inflammation. Pourtant, les connaissances disponibles les concernant paraissent encore largement empiriques et imprécises. La finalité des travaux conduits sur ces sujets au cours des dix dernières années à l'INERIS est de contribuer à lever ces incertitudes.

DISPOSITIFS EXPERIMENTAUX

1. Les méthodes “ standard ”

Dans la catégorie “ flammes et surfaces chaudes ”, on peut retenir comme exemple la surface chauffante d’une chaudière, d’un sécheur, etc...mais il peut également s’agir de surfaces chauffées de dimensions beaucoup plus réduites, comme l’impact d’un faisceau lumineux intense (ex : laser) sur une cible absorbante ou un petit composant électronique (ex : résistance) qui chauffe par effet Joule. L’expérience acquise de longue date pour les atmosphères gazeuses explosives [2] indique que la surface du corps chauffé est un paramètre à prendre en compte. Cet aspect spécifique très important ne semble pas avoir fait l’objet d’une grande attention pour ce qui concerne les nuages de poussières. A l’heure actuelle, on détermine une température critique d’inflammation (TCI) au moyen d’un appareillage standard comme par exemple le four dit de “ Godbert-Greenwald ” [3]. Il s’agit d’un four tubulaire vertical (diamètre de la chambre 2,5 cm et hauteur 15 cm) dans lequel on introduit pneumatiquement un petit nuage de la poussière à étudier. On recherche, en suivant une procédure d’essai standard, la température juste suffisante pour enflammer le nuage. La méthode paraît assez sélective mais l’extrapolation des résultats à des configurations industrielles reste une question à débattre.

Il semble un fait acquis que l’impact des poussières sur les parois du confinement au sein duquel elles sont véhiculées peut être générateur de grandes quantités d’électricité statique [4]. Cette énergie peut être déchargée brutalement (en quelques microsecondes ou quelques dizaines de microsecondes) sous la forme d’une étincelle. Des méthodes standard sont utilisées pour évaluer une “ sensibilité ” des nuages de poussières vis-à-vis de la mise à feu par une décharge d’électricité statique. En France, on utilise une version modifiée de l’inflamateur de Hartmann [5]. Il se compose d’une chambre d’explosion (tube vertical ouvert en haut, long de 30 cm et d’environ 10 cm de diamètre) munie à sa base d’un dispositif de dispersion pneumatique des poussières. L’étincelle est produite entre deux électrodes dans le tiers inférieur de la chambre grâce à un circuit électrique capacitif. Il existe d’autres types d’appareillage standard [6]. On détermine l’énergie minimale d’inflammation (EMI) selon une procédure standard, au cours de laquelle on fait varier la quantité de poussières en suspension. L’EMI est la quantité minimale d’énergie stockée dans la capacité permettant d’observer l’inflammation. On peut s’interroger sur la représentativité réelle de l’étincelle produite par rapport aux décharges d’électricité statique susceptibles de se produire dans l’industrie notamment eu égard à leur rendement énergétique.

La rubrique des “ frottements mécaniques ” recouvre deux types de phénomènes [7]. Dans l’hypothèse d’un frottement permanent et stable (“ friction ”), l’expérience suggère que la flamme prend naissance près de la zone de contact où la puissance mécanique est dissipée sous forme de chaleur. Le mécanisme d’inflammation semble donc celui de l’amorçage au contact d’une surface chaude de petites dimensions. A contrario, lors d’un impact, la durée du contact et donc de dissipation d’énergie peut être très réduite (quelques dizaine de microsecondes) ce qui suggérerait alors un mécanisme d’inflammation de type “ étincelle ”. Il n’existe pas de méthode d’essai standard consacrée à ce type de cause d’inflammation mais certains ont tenté [8] de

relier la nature du frottement à la TAI ou à l'EMI. Cela reste totalement empirique et critiquable.

2. Les appareillages spécifiques de cette étude

2.1. Examen de l'inflammation par une petite surface chauffée en continu

La chambre d'essai (figure 1) est composée d'une courte colonne (50 cm) cylindrique (dia 10 cm) en verre, dotée à sa base d'une membrane poreuse à l'air uniquement sur laquelle reposent les poussières à mettre en suspension[9]. Un séparateur gaz-particules est placé au sommet de la colonne. Le dernier tronçon avant le séparateur est muni d'orifices pour l'instrumentation. Le nuage de particules est produit lors de la fluidisation du lit de particules sous l'effet d'un courant d'air à faible vitesse (quelques dizaines de cm/s) introduit dans la chambre d'expansion, sous la membrane poreuse. Cette technique permet de produire des nuages homogènes, éventuellement très denses (jusqu'à 1500 g/m^3). La concentration de particules est contrôlée en permanence au moyens d'opacimètres spécialement étalonnés. La concentration est connue à 10% près.

Un faisceau lumineux intense provenant d'un laser Nd-YAG est dirigé sur une cible placée dans le nuage de poussières. La cible est un isolant thermique recouvert d'un produit dont l'absorptivité lumineuse est proche de 1 (mélanges d'oxydes métalliques) ce qui permet d'optimiser la transformation d'énergie lumineuse en chaleur. La taille de la zone chauffée est modifiée en changeant la taille du faisceau incidente au moyen de lentilles tandis que sa température, mesurée par pyrométrie, dépend également de la puissance du faisceau (typiquement entre 600 et 1400 °C). La puissance thermique reçue par la cible est contrôlée avant et après essai au moyen d'une thermopile calibrée, disposée à la place de la cible. Pendant l'essai, le faisceau lumineux est conservé de façon à maintenir la température de la cible constante.

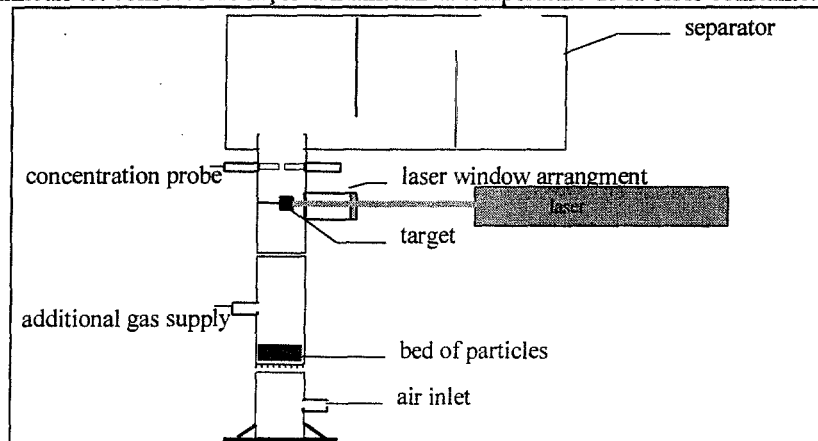


Figure 1 : dispositif d'essai pour l'examen de l'inflammation de nuages de poussières au contact de surfaces chauffées de petites dimensions

2.2. Examen de l'inflammation au contact d'une étincelle

Trois dispositifs expérimentaux ont été utilisés. Le premier est destiné à l'étude des mécanismes fondamentaux de mise à feu des nuages de poussières par une étincelle.

Il fonctionne sur le même principe que celui décrit auparavant (figure 1). A la place du système laser, un générateur d'étincelles calibrées, spécifiquement conçu pour l'étude, est utilisé [10] pour contrôler les caractéristiques de l'étincelle (temps, courant, énergie).

Le second (figure 2) est destiné à l'étude des caractéristiques (durée, énergie, forme) des étincelles de décharges électrostatiques. Les échantillons sont chargés "artificiellement" par effet Corona (pour saturer le matériau en charges électriques). Ils sont déchargés au contact d'une sphère métallique qui permet en principe de récupérer le maximum d'énergie dans l'étincelle.

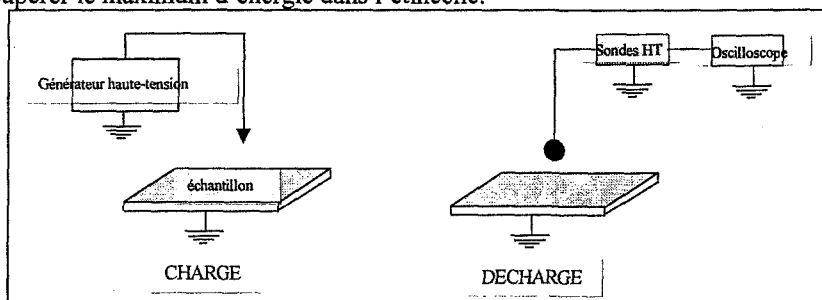


Figure 2 : dispositif d'essai pour l'étude des étincelles de décharge électrostatique

Le dernier montage a servi spécifiquement à évaluer expérimentalement, en première approche, la production d'une étincelle par un impact mécanique. Le dispositif se compose d'un mât télescopique permettant de faire tomber en chute libre un galet de 500 g environ sur une cible d'acier standard inclinable. Pour les objectifs de l'étude, l'instrumentation se limite essentiellement à une caméra vidéo rapide, sensible dans l'infrarouge. Un étalonnage préalable (avec une source chaude calibrée) a permis de relier la densité optique d'un point chaud à sa température probable.

RESULTATS

1. Surfaces chaudes

Les expériences ont été conduites avec une gamme de produits aussi représentative que possible de la réalité industrielle et de l'éventail possible des susceptibilités à l'inflammation, tant en termes d'énergie minimale d'inflammation que de température standard d'inflammation (tableau 1).

Pour des délais d'inflammation relativement longs (1 à 2 mn), c'est-à-dire pour des conditions de chauffage quasi-continues, l'analyse révèle un comportement analogue pour les nuages de poussières étudiées et pour les prémélanges gazeux inflammables [9]. Dans ces conditions opératoires, l'équilibre thermique de la cible est atteint et la puissance thermique déposée par le faisceau sur la cible est égal à celle fournie par la cible au mélange.

En particulier¹ :

¹ On rappelle que la cible est chimiquement inerte : lorsque la cible est recouverte d'un produit pulvérulent combustible (les particules du nuage par exemple), on constate que l'éventuel effet promoteur

- ✓ les conditions optimales pour la mise à feu ne correspondent pas à des mélanges stoechiométriques mais plutôt riches (en général plusieurs centaines de g/m^3 pour les nuages de poussières) ;
- ✓ lorsque la dimension du point chaud est petit (moins de $0,5 \text{ cm}^2$), la puissance thermique juste suffisante pour provoquer l'inflammation reste constante à mesure que le diamètre de la zone chauffée diminue ;
- ✓ au delà, cette puissance augmente proportionnellement avec la surface de la zone chauffée (dans la gamme $0,5$ à 5 cm^2);
- ✓ pour de " petites " surfaces chaudes (moins de $0,5 \text{ cm}^2$), les mesures montrent que la température à l'inflammation augmente fortement à mesure que le diamètre du point chaud diminue. A contrario, pour des surfaces chauffées plus " grandes " ($0,5$ à 5 cm^2), la température à l'inflammation est plus basse et varie très peu avec la taille de la zone chauffée;
- ✓ un lien (figure 3) semble avoir été mis en évidence entre cette valeur minimum de la température d'inflammation et la température " standard " d'inflammation (TCI) des poussières considérées. A ce stade, cette relation reste empirique. Elle traduit le fait que les particules qui présentent une plus grande susceptibilité à l'inflammation dans l'appareillage standard, s'enflamment plus facilement au contact d'une surface chaude. Une analyse théorique est en cours pour préciser le rôle des paramètres géométriques (dimensions de l'appareil standard et de la surface chaude).

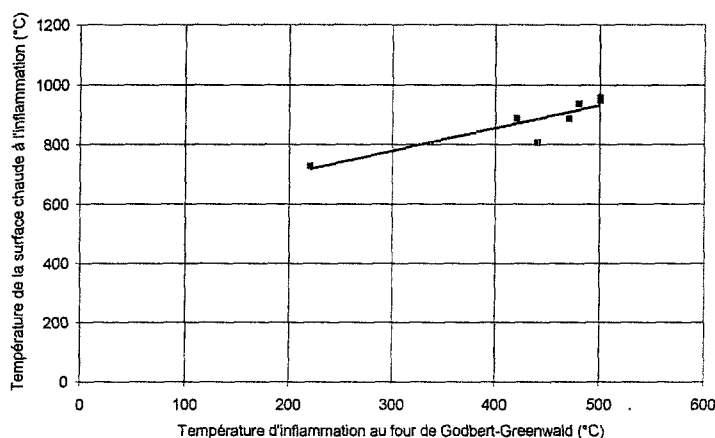


Figure 3 : lien possible entre TCI et la température de la surface chaude au moment de l'inflammation (dimensions de la surface chaude entre $0,5$ et 5 cm^2)

2. Etincelles

2.1. Mécanismes d'inflammation

de la réactivité de la cible est couvert par la réduction de l'absorptivité (par rapport à la cible inerte) et le déficit local d'oxygène.

Les premières conclusions de cette partie de l'étude ont été présentées auparavant [11]. Les essais suggèrent nettement (figure 4) que le processus de développement de la flamme dans les premiers instants sont tout à fait comparables à ceux mis en évidence pour les flammes de prémélanges gazeux [12]. En particulier, il existe une phase préliminaire d'équilibre métastable où la flamme "hésite" entre développement et extinction (les deux images de gauche). La taille de ce noyau de flamme semble pouvoir être, comme pour les prémélanges gazeux, comparée à la "distance de coincement" du mélange considéré tandis que l'énergie minimale d'amorçage (EMIA), qui permet à la flamme de dépasser ce point d'équilibre métastable, suit la corrélation EMIA-distance de coincement établie de longue date pour les prémélanges gazeux [13]. Comme la distance de coincement est considérée comme un paramètre fondamental de la combustion (ne dépend que du mélange), il doit en être de même pour l'EMIA.

Enfin, la relation expérimentale établie entre l'EMIA et la durée de dépôt de l'énergie confirme également les ordres de grandeur observés pour les prémélanges gazeux, avec un optimum de l'ordre de plusieurs dizaines de microsecondes pour une valeur de l'EMIA de 20 mJ.

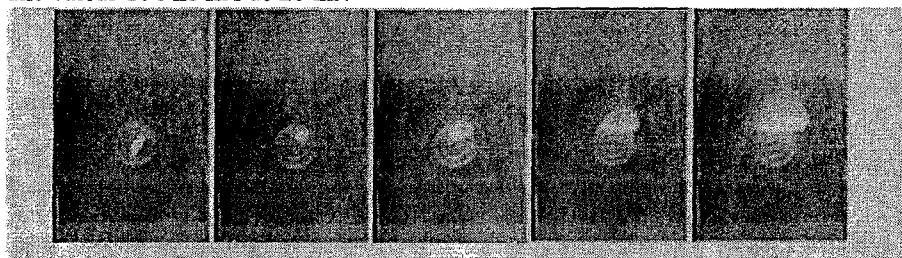


Figure 4 : développement de la flamme autour d'une étincelle dans un nuage air-particules d'amidon (20 ms entre images, concentration : 140 g/m³)

2.2. Efficacité des décharges d'électricité statique

La plupart des types possibles d'étincelles ont été examinés tels les décharges entre corps conducteurs (A), entre un corps conducteur et un corps isolant (B : décharges en "aigrettes"), entre un corps conducteur et un corps isolant doublé d'un conducteur relié à la terre (C : décharges "glissantes de surface").

L'objectif essentiel des essais de laboratoire conduits jusqu'alors est de préciser cette typologie et de quantifier le rendement énergétique des étincelles plutôt que de reproduire exactement la situation industrielle. En particulier, l'un des paramètres important est le potentiel maximum que peut atteindre l'objet qui se charge. Ce potentiel dépend non seulement de l'objet lui-même mais également du mécanisme d'apport des charges (transport pneumatique, déversement manuel de poussières, etc...). En laboratoire, nous avons reproduit artificiellement les potentiels maximum qui semblent pouvoir être atteints en pratique.

Les mesures ont notamment montré que le rendement électrique des étincelles (énergie délivrée dans l'étincelle/énergie déposée dans le corps) est très bon, de l'ordre de 1.

Quelques résultats-type sont regroupés dans le tableau 2. Il apparaît que des étincelles très puissantes (plusieurs joules) sont dans la pratique industrielle possibles même avec des corps isolants si les conditions d'apparition de "décharges glissantes de surface" sont réunies.

Un graphe énergie-temps est proposé sur la figure 6 pour tous les types d'étincelles (A,B et C). Ces données ont été extraites des mesures réalisées en laboratoire à ce jour. Il apparaît nettement que toutes les décharges sont regroupées dans un même domaine énergie-temps, ce qui signifie vraisemblablement qu'elles sont de même nature électrique. On remarque également que les étincelles produites dans l'appareillage standard utilisé par l'INERIS se situent dans un domaine très différent. Cette remarque serait également valable pour tous les autres types d'appareillages standard [6].

Par ailleurs, l'observation visuelle des décharges d'électricité statique a permis de vérifier que la structure spatiale des décharges d'isolant est largement tridimensionnelle alors qu'elle est quasi ponctuelle pour les décharges entre corps conducteurs. Les pertes d'énergie dans l'espace des premières sont donc plus importantes ce qui doit avoir une incidence du point de vue de l'inflammation.

2.3. Energie d'un impact mécanique

Dans la plupart des cas, la durée du contact est très brève : le projectile frappe la cible, s'arrête très brièvement (moins de 250 μ s) puis rebondit après déformation éventuelle de la cible ou du projectile. Il s'agit d'un impact "simple". Dans un nombre plus réduit de situations, notamment lorsque la cible est fortement inclinée (au moins 45°), le projectile frotte sur la cible au moins pendant la phase d'arrêt puis ricoche ou glisse le long de la cible. C'est dans cette situation seulement que des "flashes" ont été observés au point d'impact (figure 5). Nous appellerons cette situation, "ripage". Les deux types d'impacts ont des durées compatibles avec le mécanisme d'inflammation par étincelle (EMI).

Les "flashes" peuvent rester visibles pendant 10 à 50 ms. L'examen des films, notamment de la densité optique des "flashes", révèle que leur température serait supérieure à 800 °C. Leur dimension serait de l'ordre de 1 mm si bien que l'énergie thermique correspondante pourrait être de l'ordre de plusieurs Joules.

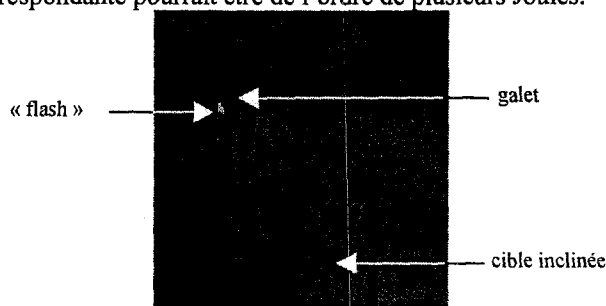


Figure 5 : exemple de flash suite à un ripage

La nature exacte de ce flash reste obscure à l'heure actuelle. Il pourrait s'agir d'une petite quantité de matière éventuellement arrachée par "écaillage" (ondes de détente) aux deux corps et portée instantanément à haute température.

Si tel est le cas, seule une petite partie de cette énergie sera transférée effectivement vers l'atmosphère explosive. D'après les théories classiques des chocs thermiques, le ratio devrait approximativement être dans le rapport des diffusivités thermiques de l'atmosphère et des corps solides. Quelques expériences de chocs thermiques ont été réalisées au moyen de l'installation de la figure 1 en faisant fonctionner le laser à forte puissance sur des durées courtes. Pour des nuages air-particules d'amidon, on obtient une courbe d'énergie d'inflammation dont le minimum (2000 mJ) correspond aux proportions stoechiométriques comme on pourrait s'y attendre. En revanche, l'énergie minimale (quelques joules) est plus grande que l'EMIA (20 mJ) de deux ordres de grandeur pour ce mélange. Ce rapport est proche de celui des diffusivités thermiques évoqué ci-avant.

CONCLUSIONS

A propos des étincelles d'origine électrostatique, l'analyse de ces nouvelles données indique qu'aucun des appareillages standard actuels ne permet de reproduire de façon satisfaisante les caractéristiques électriques de ces étincelles [6]. On remarque par exemple (figure 6) que l'appareil Hartmann exploité par l'INERIS produit des étincelles de très faible énergie, loin de couvrir tout le spectre possible des étincelles électrostatiques. En revanche, les caractéristiques durée-énergie de ces étincelles correspondent assez bien à celles qui permettent la détermination de l'EMIA. Dans ces conditions, on peut penser que le classement relatif des produits obtenus au moyen de cette mesure possède peut-être un caractère fondamental du point de vue de l'inflammation par étincelles. En second lieu, le choix de "rendements" d'étincelle, fonction de la durée et de la distribution spatiale de l'énergie, permettrait peut-être d'établir un lien quantitatif avec les différents types d'étincelles d'origine électrostatique.

A propos des surfaces chaudes, des progrès significatifs ont été réalisés qui permettent d'envisager une réelle politique de prévention. En particulier, ces travaux peuvent apporter des données directement utilisables dans l'industrie pour évaluer le pouvoir d'inflammation d'un point chaud issu d'un corps chauffé par effet joule, mais également par un autre phénomène comme l'impact d'un faisceau laser ou un frottement mécanique.

A propos des impacts mécaniques, on peut proposer un lien entre la mesure de l'EMI et l'énergie minimale d'impact via un coefficient de transfert de chaleur. Les travaux sont cependant à poursuivre notamment pour déterminer le taux de transformation de l'énergie mécanique en chaleur.

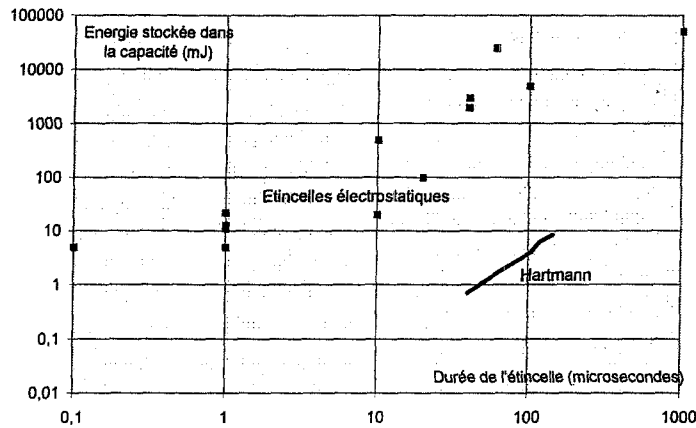


Figure 6 : Comparaison entre les différents types de décharges et l'énergie des étincelles fournies par l'appareillage standard de l'INERIS

REFERENCES

- [1] Roux, P., *Guide pour la conception et l'exploitation de silos de stockage de produits agro-alimentaires vis-à-vis des risques d'explosion et d'incendie*, rapport final INERIS, disponible sur internet (2000)
- [2] Silver, S., *The ignition of gaseous mixtures by hot particles*, Phil. Mag. S.7, vol. 23 (1937), n° 156
- [3] Field, P., *Dust explosions*, Handbook of Powder Technology, vol.4, Elsevier, ISSN 0167-3785 (1982)
- [4] Glor, M., *Electrostatic hazards in powder handling*, Research studies Press LDT, John Wiley & sons Inc (1988)
- [5] Pineau J.P. (1985), *Evaluating electrostatic hazard*, EUROPEX symposium, Ansvers, Belgique (1985)
- [6] Boudalaa, M., Proust, Ch., *Inflammation des nuages de poussières par décharges électrostatiques*, Préventique-Sécurité, n°32 (1997), pp. 77-81
- [7] Powell, F., *Ignition of gases and vapors*, Industrial and Engineering Chemistry, vol. 61(1969), pp. 29-37
- [8] Bartknecht, W. (1987), *Explosionen*, Springer – Verlag, Berlin (1987)
- [9] Carleton, F, Bothe, H., Proust, Ch., Hawksworth, S., *Prenormative Research on the Use of Optics in Potentially Explosive Atmospheres*, Final Report, contrat européen SMT4-CT96-2104 (2000)
- [10] Boudalaa, M., Proust, Ch., *Energie Minimale d'inflammation des nuages de poussières*, rapport final INERIS (1996)
- [11] Proust, Ch., *Flame kernel growth in dust air mixtures ignited by an electrical discharge*, 28th Symp. (int) on combustion, Edinbourg, Ecosse (2000)
- [12] Williams, F., *Combustion theory*, the Benjamin/Cummings Scientific Publishing Company Inc., Amsterdam, ISBN 0-8053-9801-S (1985)
- [13] Lewis, B., Von Elbe, G., *Combustion, flames and explosions of gases : 3rd edition*, Academic Press, New-York (1987)

Tableau 1 : résultats essentiels concernant les surfaces chaudes (inflammation sur cible inerte)

Poussière	Amidon	Soufre	Lignite	ABS	Lycopode	Aluminium
Nature de la poussière	alimentaire	chimie	énergie	chimie	bois	métallurgie
Diamètre de Sauter	36 µm	48 µm	17 µm	15 µm	30 µm	15 µm
Concentration	100 à 1400 g/m ³	100 à 1000 g/m ³	100 à 900 g/m ³	30 à 700 g/m ³	30 à 700 g/m ³	40 à 500 g/m ³
Puissance critique	2700 mW	1200 mW	2500 mW	5300 mW	4000 mW	/
Flux critique	260 kW/m ²	160 kW/m ²	<800 kW/m ²	<1700 kW/m ²	<1300 kW/m ²	/
Température d'inflammation sur cible	800 °C	730 °C	780 °C	930 °C	890 °C	/
Four Godbert-Greenwald	440 °C	420 °C	500 °C	220 °C	(480) °C	(600) °C
Energie d'inflammation Hartmann (mJ)	>1200	36	(200)	16	(10)	(15)

Tableau 2 : résumé des caractéristiques maximales des décharges électrostatiques étudiées

Type d'étincelle	Capacité (nF)	Configuration industrielle	Potentiel de surface (kV)	Durée de la décharge (µs)	Energie libérée aux électrodes (J)
A	<0,1	Vis/écrou, bride, récipient (<500l), jauge, outil à main	100	10	0,5
A	0,1 à 0,5	Fût, conduite, cyclone	150	100	5
A	0,5 à 2	Citerne, silo	100 à 300	1000	50
B	0,05	Isolant seul	30	0,1	0,00005
C	2,5	Métal recouvert d'une couche isolante de 1 mm	30	50	2
C	5	Métal recouvert d'une couche isolante de 0,5 mm	30	50	3
C	30	Métal recouvert d'une couche isolante de 0,1 mm (Traitement de surface sur métaux)	40	50	25