

→ G. Ronchail, INERIS,
Verneuil-en-Halatte (1)
et J.M. Petit,
service Risque chimique
et protection individuelle,
INRS, Paris

Caractéristiques d'explosivité de poussières industrielles

Détermination expérimentale sur six échantillons représentatifs

EXPLOSIVITY CHARACTERISTICS OF INDUSTRIAL DUSTS

EXPERIMENTAL DETERMINATION
ON SIX REPRESENTATIVE SAMPLES

After a reminder of the mechanism of dust explosions and of some of the characteristics of dusty atmospheres, this data sheet presents the results of experiments conducted by INERIS, under an agreement with INRS, on six industrial powdery products supplied by the risk prevention departments of the regional health insurance funds (CRAMs) with a view to determining their explosivity characteristics.

The experimental programme adopted proposes a reasonable set of validated, progressive tests which managers can use to determine the explosivity characteristics of the dusts present in their plants, in order to take appropriate prevention and protection measures.

● dust explosion ● explosivity characteristics ● experimental determination

Après avoir rappelé le mécanisme des explosions de poussières ainsi que quelques caractéristiques des atmosphères poussiéreuses, cet article présente les résultats expérimentaux de détermination des caractéristiques d'explosivité, obtenus avec six produits pulvérulents industriels transmis par les services prévention de Caisses régionales d'assurance maladie (CRAM), et réalisés par l'INERIS (1) dans le cadre d'une convention signée avec l'INRS.

Le programme expérimental retenu propose un ensemble raisonnable de tests validés et progressifs auxquels pourraient recourir les responsables d'entreprise pour connaître les caractéristiques d'explosivité des poussières présentes dans leurs unités, caractéristiques indispensables à la mise en place des moyens de protection et de prévention.

● explosion de poussière ● caractéristiques d'explosivité ● détermination expérimentale

Les explosions de poussières dans l'industrie sont un phénomène très général, qui concerne de nombreuses entreprises. Toutes les poussières de matières combustibles sont susceptibles de provoquer une explosion. C'est le cas par exemple des poussières :

- alimentaires (amidon, sucre, farine, céréales...),
- végétales (écorces, liège, coton, bois...),
- métalliques (aluminium, magnésium, fer-roallages...),
- industrielles (engrais, matières plastiques, caoutchouc, déchets pulvérulents...).

On estime qu'en France se produit, en moyenne, une explosion de poussières par jour. Le risque a été amplifié par l'industrialisation croissante, par la mécanisation, par la généralisation des automatismes, par l'augmentation des capacités de stockage, par l'accroissement des débits de manutention et enfin par le nombre de plus en plus élevé de produits présentés sous forme pulvérulente avec des granulométries de plus

en plus faibles (diamètre médian de l'ordre de quelques microns).

Toutes les entreprises qui manipulent des produits pulvérulents sont donc confrontées à un risque potentiel d'inflammation et d'explosion de poussières. La prévention passe d'abord par la connaissance des caractéristiques d'explosivité des poussières; il est en effet nécessaire de détenir ces paramètres pour choisir, dans les conditions particulières d'une installation donnée, les meilleurs modes de protection possibles.

Dans la majorité des cas, on peut utiliser les données de la littérature. Toutefois, la détermination expérimentale est indispensable lorsqu'il s'agit soit d'un produit inconnu, soit d'un produit de caractéristiques incertaines (à la limite d'un seuil de classification dans telle ou telle catégorie).

(1) Institut national de l'environnement industriel et des risques, BP 2, Parc Technologique ALATA, 60550 Verneuil-en-Halatte.

1. Mécanisme des explosions de poussières

Pour qu'une explosion (transformation brutale d'un système matériel avec émission de gaz chauds) soit possible, il est indispensable d'avoir trois conditions simultanées :

■ **Présence d'un gaz comburant** (pratiquement toujours l'oxygène de l'air).

■ **Présence d'un produit pulvérulent combustible à l'état suffisamment divisé** (au moins une partie des particules dont le diamètre est inférieur à 0,3 mm).

■ **Présence d'une source d'inflammation** : pour amorcer l'explosion, l'action principale de la source d'inflammation est d'élever, au moins localement, le nuage de poussières à une température telle que la réaction d'oxydation responsable de la combustion se produise à une vitesse suffisante. La réaction peut se faire en phase hétérogène ou homogène.

Dans la pratique industrielle, les principales sources d'inflammation sont :

- les étincelles, provoquées soit par la friction ou l'électricité statique, soit à partir du matériel électrique,
- une flamme,
- une surface chauffée,
- des travaux par point chaud (soudure),
- l'auto-inflammation d'un dépôt de poussières,
- des particules incandescentes.

TABLEAU I

VITESSES DE SÉDIMENTATION EN FONCTION DES DIAMÈTRES DES PARTICULES

Diamètre des particules (µm)	Vitesse de sédimentation (m. s ⁻¹)
200	1,2
100	0,3
50	0,03
10	0,003 (≈ 11 m. h ⁻¹)
5	0,0007 (≈ 2,52 m. h ⁻¹)
1	0,00003 (≈ 0,1 m. h ⁻¹)

Ce fameux « triangle du feu » qu'est la réunion des trois conditions indique que l'explosion n'est qu'un cas particulier de la combustion; il s'agit d'une combustion qui se déroule très rapidement.

Pour que cette combustion puisse être qualifiée d'explosion, trois conditions complémentaires sont nécessaires :

■ **Présence de poussières en suspension** : un nuage de poussières peut être créé par le processus même du traitement du produit, broyage, séchage en lit fluidisé, par exemple. Il peut l'être aussi par les manutentions qu'il subit : vidange de silos, transport pneumatique, décolmatage de filtres, etc. Il peut également être provoqué par le démarrage de l'explosion elle-même.

La dispersibilité des poussières est difficile à caractériser. Elle est en principe d'autant plus grande que la masse volumique de la poussière est faible. De plus, elle dépend de sa cohésion, celle-ci étant liée à l'humidité et à la forme des particules.

Les poussières fines restent le plus longtemps en suspension : il y a donc là une raison supplémentaire pour qu'elles soient les plus dangereuses.

Le tableau I indique les vitesses de sédimentation en fonction de la taille des particules, lorsqu'il n'y a pas de turbulence.

■ **Obtention d'un domaine d'explosivité** : des limites d'explosivité délimitent le domaine de concentration de poussières dans l'air à l'intérieur duquel les explosions sont possibles.

Comme pour les gaz, on définit pour les poussières une concentration minimale explosive au-dessous de laquelle l'explosion ne peut pas se propager dans un nuage préformé; mais autant cette grandeur peut être mesurée avec assez de précision dans le cas des gaz, autant il est difficile expérimentalement de réaliser des suspensions homogènes de poussières, surtout si elles sont grossières. De plus, les valeurs trouvées dépendent de l'énergie de la source d'inflammation et du volume de l'enceinte dans laquelle la mesure a été faite. Il faut donc considérer avec prudence les chiffres de concentrations minimales explosives C_{\min} parfois avancés. Les concentrations minimales explosives des poussières dont le diamètre est inférieur à 100 µm se situent couramment dans la fourchette 20 à 100 g. m⁻³. Ceci correspond déjà à des nuages de poussières relativement denses.

Quant à la concentration maximale explosive des poussières, elle est encore bien plus incertaine et se situe probablement dans la gamme de plusieurs kg. m⁻³.

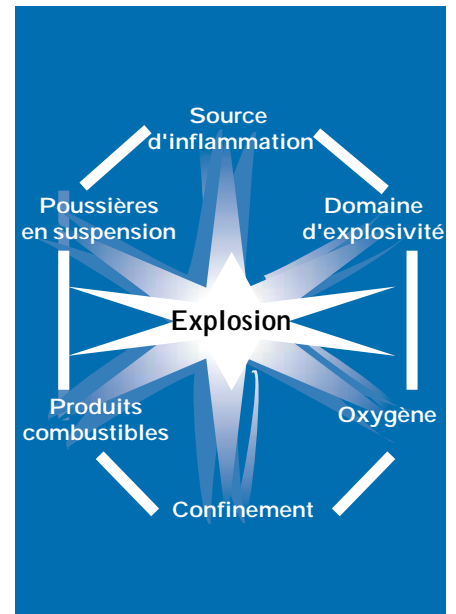


Fig. 1. « L'hexagone » de l'explosion

■ **Confinement suffisant** : en absence de confinement, on obtient un phénomène de flambée (combustion rapide avec flamme importante certes mais sans effet de pression notable). Toutes ces conditions sont schématisées sur la figure 1.

Diverses observations ont pu montrer qu'à un instant donné, dans un nuage qui vient d'être enflammé, l'atmosphère poussiéreuse est séparée en deux régions. La partie en arrière du front de flamme contient des gaz et des résidus solides déjà partiellement brûlés, la partie en avant du front de flamme contient des poussières non brûlées. Si ce processus se passe à l'air libre, nous observons simplement une boule de feu (flambée) avec tous les dégâts que cela peut entraîner.

Si le phénomène est étudié dans une enceinte fermée, on constate l'apparition d'une surpression due au fait que les gaz de combustion créent une chasse d'air qui pourra soulever les poussières présentes en dépôt. La flamme qui se propage en arrière enflammera les poussières soulevées et ce phénomène pourra ainsi se reproduire de proche en proche tant que la poussière est présente.

- Les caractéristiques de l'explosion dépendent de la géométrie du confinement :

- dans un récipient peu allongé, l'expansion des gaz de combustion précomprime l'atmosphère poussiéreuse en avant du front de flamme; la vitesse de flamme est assez faible, quelques dizaines de m. s-1 au maximum et la pression maximale atteindra 7 à 10 bars;

- par contre, dans une canalisation, l'expansion des gaz peut conduire à des vitesses de propagation de flamme très élevées, de l'ordre de 1500 m s-1 et des surpressions de plusieurs dizaines de bars;

- la présence d'obstacles modifiera notablement la propagation de l'explosion.

• Une explosion peut se produire selon deux régimes : la déflagration ou la détonation. Seules des mesures sur les caractéristiques de l'explosion (pression et vitesse de flamme) permettent de savoir si l'un ou l'autre régime est atteint :

- en milieu confiné, dans le régime de déflagration qui est le cas général pour les poussières, la flamme se propage à vitesse subsonique et est précédée par une chasse d'air due à l'expansion des gaz brûlés qui se déplacent à vitesse sonique dans les gaz de combustion. Compte tenu du fait que la flamme se propage dans un milieu lui-même en écoulement, la vitesse apparente de la flamme (= vitesse de propagation de la flamme par rapport à un repère lié aux poussières + vitesse d'expansion des gaz brûlés) peut aller jusqu'à 1500 m s-1;

- dans des cas particuliers en canalisation, un régime de quasi détonation peut être atteint. La vitesse de flamme est alors supersonique dans le milieu considéré, la pression présente une variation brutale et on peut atteindre pendant des temps courts, de l'ordre de la milliseconde, des surpressions de plusieurs dizaines de bars. C'est cette onde de pression qui chauffe le mélange réactionnel suffisamment brutalement pour que la réaction de combustion se produise immédiatement.

Pour la pratique industrielle, il faut retenir que de tels phénomènes de quasi détonation peuvent être obtenus dans des canalisations de diamètre compris entre 50 et 400 mm à condition que la longueur de canalisation atteigne au moins une vingtaine de mètres et qu'ils sont encore plus à craindre si la canalisation est reliée à un récipient fermé de volume supérieur à celui de la canalisation et si l'explosion se produit dans ce récipient. Toutes ces remarques mettent en évidence la complexité des phénomènes d'explosion de poussières et font qu'il n'est pas possible de caractériser de telles explosions par des vitesses de propagation de flamme et des pressions maximales d'explosion déterminées.

2. Caractéristiques des atmosphères poussiéreuses

Il existe de multiples essais destinés à réunir les données nécessaires à la prévention des risques liés à la présence de poussières industrielles. Etre en possession des caractéristiques d'explosivité des mélanges inflammables permet, en particulier, de choisir parmi les différents modes de protection possibles celui (ou ceux) qui est (sont) le(s) plus approprié(s).

2.1. Caractéristiques physiques

Des caractéristiques physiques telles que le taux d'humidité du produit, son taux de cendres et sa répartition granulométrique jouent un rôle important sur le domaine d'explosivité, l'aptitude à l'inflammation et la violence de l'explosion.

2.2. Aptitude à l'inflammation des nuages de poussières

L'énergie de la source d'inflammation doit être suffisamment grande pour amorcer l'inflammation. Ceci peut être réalisé par l'action d'une étincelle ou par l'action de la température dans l'ensemble du volume

concerné. L'aptitude à l'inflammation des poussières dépend de la nature de la poussière, de sa répartition granulométrique, de la concentration et de l'homogénéité du nuage de poussières.

Pour qualifier l'aptitude à l'inflammation par étincelle, on détermine la plus faible valeur de l'énergie de l'étincelle permettant d'obtenir une inflammation du nuage de poussières. Avec l'appareil Hartmann, il est courant de trouver des valeurs s'échelonnant de quelques millijoules à plusieurs joules. Mais récemment, certains auteurs ont pu montrer expérimentalement qu'on pouvait trouver des inflammations de nuages de poussières pour des valeurs d'énergie de l'ordre du millijoule, donc assez voisines de celles relevées pour certains gaz. Les caractéristiques de l'étincelle (tension, intensité et surtout durée) ont une influence considérable sur l'énergie minimale d'inflammation.

En ce qui concerne le risque d'auto-inflammation des nuages de poussières, on recourt à la détermination de la température d'auto-inflammation dans des essais normalisés (aux fours BAM ou Godbert-Greenwald). Des valeurs obtenues à l'INERIS par ces deux méthodes sont données dans le tableau II. Elles s'échelonnent entre 150 et 580 °C.

L'essai au four Godbert-Greenwald a été proposé comme essai normalisé (norme CEI 1241-2-1) par la Commission électrotechnique internationale [1].

TABLEAU II

DÉTERMINATION DE LA TEMPÉRATURE D'AUTO-INFLAMMATION DE NUAGES DE POUSSIÈRES

Produits	Températures d'auto-inflammation (°C) déterminées par la méthode :	
	Four de type Godbert-Greenwald	Four de type BAM
Aluminium	580	pas d'inflammation à 580
Amidon	400	360
Farine de bois	440	380
Poudre de résine époxydique	580	500
Sucre glace	360	340
Farine de blé	420	370
Soufre	300	150
Charbon de Montrambert	580	460

2.3. Violence des explosions (en chambre fermée)

Surpression maximale d'explosion et vitesse maximale de montée en pression : détermination du K_{max} (ou K_{St})

Dans des récipients peu allongés (rapport longueur ou diamètre sur hauteur inférieur à 5), la violence de l'explosion d'un nuage de poussières combustibles est caractérisée par la vitesse maximale de montée en pression VMP et la surpression maximale d'explosion P_{max} . Ces valeurs, pour des conditions d'essais données, sont mesurées sur la courbe pression-temps (fig. 2). Pour une poussière donnée, on cherchera à déterminer les valeurs les plus élevées de P_{max} et surtout de VMP en faisant varier la concentration du nuage de poussières. Ces caractéristiques de violence de l'explosion dépendent aussi de la répartition granulométrique, de la forme des grains, de la turbulence initiale du nuage de poussière dans l'air, de l'importance de la source d'amorçage, voire de la forme du récipient d'essai.

La valeur de VMP dépend aussi du volume V de l'appareillage d'essai selon une relation dite « relation cubique » :

$$VMP \cdot V^{1/3} = \text{Constante } K_{max} \text{ (ou } K_{St})$$

La loi cubique ne s'applique que pour des volumes d'enceintes de forme peu allongée. K_{max} est une caractéristique d'une poussière de granulométrie et d'un taux d'humidité donnés. La violence d'une explosion est caractérisée par cette valeur K_{max} . Ces valeurs permettent de classer une poussière combustible dans l'une des catégories constituées (tableau III).

Des méthodes normalisées de mesure sont retenues dans les normes U 54-540 [2] et NF EN 26184-1 [3]. C'est à partir des valeurs de violence d'explosion ainsi obtenues

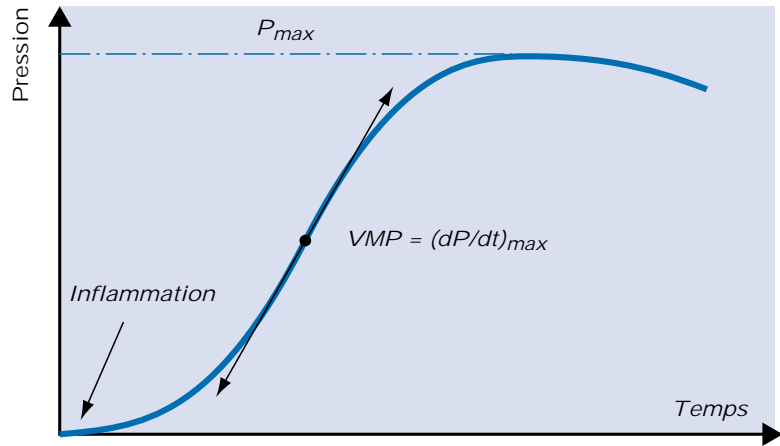


Fig. 2. Courbe pression-temps

nues qu'il est possible de définir les moyens de se protéger contre les effets de l'explosion : événements de décharge, extincteurs déclenchés...

En ce qui concerne la propagation dans les récipients allongés, il est nécessaire de prendre en considération l'ensemble du phénomène de propagation par une analyse détaillée des diagrammes de marche des ondes de pression et du front de flamme en tenant compte d'interactions possibles.

2.4. Aptitude des couches de poussières à l'inflammation

Lorsqu'un produit en couche mince (épaisseur inférieure au centimètre) est placé sur une surface chaude pendant un temps suffisamment long, on constate parfois une auto-inflammation de la couche. Les valeurs des températures d'auto-inflammation ainsi obtenues avec une méthode normalisée (norme internationale CEI 1241-2-1 [1] pour une couche de 5 mm d'épaisseur) sont données dans le tableau IV et montrent que l'inflammation peut se produire à des températures de 200 à 300 °C, températures toujours inférieures aux valeurs correspondantes en nuage.

Ces températures peuvent être nettement plus basses encore dans le cas de produits contenant ou souillés par des huiles ou des graisses non saturées (lin, oléagineux, lait en poudre...) facilement oxydables; elles décroissent si l'épaisseur du dépôt augmente, parce que la dissipation de la chaleur produite par la réaction d'oxydation se fait de plus en plus mal.

De tels phénomènes d'auto-inflammation dans des stockages de grandes dimensions, initialement à température voisine de l'ambiante, peuvent se produire pour des temps compris entre quelques minutes et

plusieurs mois et conduisent à des incendies très difficiles à maîtriser.

D'autres caractéristiques d'explosivité peuvent également être déterminées, apportant pour la mise en place des moyens de prévention des éléments d'information supplémentaires. Nous citerons tout particulièrement :

La résistivité volumique spécifique des dépôts de poussières

Cette caractéristique est importante à connaître pour le choix du matériel électrique à utiliser en atmosphère poussiéreuse. On retiendra que les poussières sont considérées comme conductrices si leur résistivité est inférieure à $10^3 \Omega \cdot m$. Dans ce cas, il faudra utiliser du matériel électrique étanche aux poussières d'une catégorie égale à IP 6 (2). La méthode de détermination est donnée dans la norme internationale CEI 1241-2-2 [5].

La concentration limite en oxygène permettant d'éviter l'explosion

Cette concentration limite peut être définie comme la teneur la plus élevée en oxygène en dessous de laquelle l'explosion devient impossible. Elle est en général de l'ordre de 10 à 15 %, encore qu'il existe des produits capables de donner des explosions à des teneurs de 7 % en oxygène.

(2) Le degré d'étanchéité des enveloppes des matériels électriques est symbolisé (cf. norme NF EN 60529 [6]) par les lettres IP suivies, généralement, de deux chiffres, le premier caractérisant le degré de pénétration des corps solides et le second désignant le degré de protection contre la pénétration des liquides.

TABLEAU III

CLASSEMENT PAR CATEGORIES DES POUSSIÈRES COMBUSTIBLES

Classe	K_{max} (bar.m.s ⁻¹)
St 0	0
St 1	$1 < K_{max} < 200$
St 2	$200 < K_{max} < 300$
St 3	$K_{max} > 300$

Il faut aussi préciser que si pour cette teeneur l'explosion n'est plus possible elle ne permet pas d'empêcher la combustion de la poussière en dépôt.

On peut donc prévenir l'explosion de poussières dans des enceintes closes en diminuant au-dessous d'une certaine valeur, par dilution au moyen d'un gaz inerte, la proportion d'oxygène dans l'atmosphère initiale. Les gaz de mise à l'état inerte les plus courants sont le dioxyde de carbone et l'azote, sous réserve qu'ils ne réagissent pas avec les poussières.

3. Détermination expérimentale des caractéristiques d'explosivité

La connaissance des principales caractéristiques d'explosivité des poussières combustibles est indispensable pour la mise en place de moyens de protection et de prévention.

Aussi, à la demande des services prévention des CRAM, l'INRS a lancé une étude, dans le cadre d'une convention signée avec l'INERIS, afin de proposer un ensemble cohérent de tests validés auxquels pourraient recourir les responsables d'entreprise.

Six produits pulvérulents, prélevés dans différents établissements industriels et transmis par les services prévention de CRAM, ont été sélectionnés. Des essais expérimentaux ont été réalisés afin d'étudier l'inflammabilité et l'explosivité des nuages de poussières de ces six échantillons, ainsi que l'inflammabilité des dépôts de ces six mêmes poussières.

Le programme d'essais, comprenant quatre étapes (préparation et caractérisation; aptitude à l'inflammation des nuages; violence d'explosion des nuages; stabilité thermique des dépôts de poussières) a porté sur les six échantillons de poussières correspondant aux produits numérotés 1 à 6 (cf. encadré).

Remarque :

Dans la suite de l'article, les échantillons seront désignés par leurs références (produits n° 1 à 6), qui sont décrites, ainsi que la procédure de prélèvement, dans l'encadré ci-contre.

TABLEAU IV

TEMPÉRATURES D'AUTO-INFLAMMATION OBTENUES AVEC LA MÉTHODE CEI 1241-2-1 (D'APRÈS [4])

Poussières (granulométrie) (Valeur médiane, μm)	Temp. d'inflammation du nuage au four Godbert-Greenwald ($^{\circ}\text{C}$)	Temp. d'inflammation du dépôt de poussières Couche 5 mm ($^{\circ}\text{C}$)
Amidon (52)	350	345
Céréales (50)	520	300
Charbon (28)	600	250
Coprah (510)	470	290
Farine de bois (65)	490	340
Lait en poudre (60)	610	340
Maïs (550)	780	410
Maïs (28)	440	280
Soja farine (20)	620	280
Sucre (30)	490	480
Tabac (65)	450	300

DESCRIPTION DES PRODUITS ÉTUDIÉS ET PROCÉDURE DES PRÉLÈVEMENTS

Produits étudiés

- Produit n° 1 (CRAM Nord-Est) : poussières, essentiellement de polypropylène, recueillies dans une unité de fabrication d'emballages en matières plastiques.
- Produit n° 2 (CRAM Languedoc-Roussillon) : poussières de liège, recueillies dans un atelier de travail du liège.
- Produit n° 3 (CRAM Normandie) : poussières, essentiellement de cellulose (90 %), recueillies dans une usine de produits d'hygiène, sur une ligne de production de couche-culottes.
- Produit n° 4 (CRAM Auvergne) : poussières de bois reconstitué, recueillies dans une fabrique de matériel de bureau.
- Produit n° 5 (CRAM Rhône-Alpes) : poussières de déchets, riches en poussières de papier, recueillies dans un centre de tri d'ordures ménagères.
- Produit n° 6 (CRAM Aquitaine) : poussières de fibres de carbone, recueillies dans une entreprise usinant sur tour des pièces en fibres de carbone.

Prélèvements

Pour les six poussières industrielles, a été respectée la procédure ci-dessous :

① Les produits ont été prélevés, dans des sacs en plastique, à raison d' au moins 2 kg de poussières.

② Les échantillons prélevés étaient représentatifs de la fabrication concernée; on a notamment veillé à prélever les échantillons les plus secs et les plus fins qui ont pu être trouvés dans l'installation.

③ Une fiche de renseignements a été remplie dans laquelle figuraient :

- Le nom du préleveur.
- Le nom et les coordonnées de l'entreprise.
- Les renseignements relatifs au prélèvement :
 - la date du prélèvement,
 - la désignation du produit,
 - la désignation de l'atelier et localisation du prélèvement,
 - le type de procédé où se rencontrent les poussières (broyage, transport mécanique, transport pneumatique),
 - l' humidité relative de l'air ambiant,
 - les caractéristiques de l'installation,
 - l'expression des besoins.

3.1. Préparation et caractérisation des échantillons

Les essais de préparation et de caractérisation de la poussière, d'ailleurs préconisés par les normes U 54-540 et NF EN 26184-1 [2, 3] comprennent :

- la détermination de la répartition granulométrique,
- la détermination de la teneur en eau,
- l'analyse élémentaire (C, % H, % N...),
- le taux de cendres, applicable aux poussières susceptibles de contenir des matières inertes.

Les taux d'humidité et de cendres mais surtout la répartition granulométrique des poussières jouent un rôle important sur les caractéristiques d'inflammabilité et d'explosivité. Généralement toutes les mesures sont faites sur des produits de granulométrie inférieure à 0,1 mm.

De plus, on ne peut valablement comparer que des résultats obtenus dans des appareils identiques.

Tous les essais ont été réalisés avec les produits tamisés (diamètre du tamis inférieur à 0,315 mm) de façon à éliminer les gros agglomérats présents dans les échantillons reçus. Ces échantillons n'ont pas subi de traitement préalable tel que séchage.

Pour le produit n° 3 (cellulose), l'échantillon a été partiellement broyé avant les essais, l'opération réalisée étant plutôt un cardage qu'un véritable broyage.

Analyses immédiate et élémentaire

Les résultats des analyses figurent dans le tableau V et correspondent à la moyenne effectuée sur deux essais.

Analyse granulométrique

a) Tamisage mécanique

Pour les produits n°s 3 et 5, l'analyse granulométrique a été réalisée par tamisage mécanique. Les résultats sont reportés dans le tableau VI.

b) Laser

L'analyse granulométrique a été effectuée à l'aide d'un granulomètre à laser Malvern 2600 C selon le principe décrit dans la norme NF X 11-666 [7]. Les résultats obtenus sont consignés dans les tableaux VII à X.

TABLEAU V

RÉSULTATS DES ANALYSES IMMÉDIATE ET ÉLÉMENTAIRE

Référence de l'échantillon	Sur brut en % Taux d'humidité	Sur sec (en %)			
		C	H	N	Taux de cendres
Produit n° 1	0,48	77,5	12,65	0,12	5,52
Produit n° 2	3,5	61,50	8,20	0,93	0,85
Produit n° 3	6,99	44,31	6,49	< 0,1	5,60
Produit n° 4	6,27	50,91	6,80	3,58	0,43
Produit n° 5	5,20	39,27	5,23	1,02	30,20
Produit n° 6	0,13	100	—	—	0,05

TABLEAU VI

ANALYSE GRANULOMÉTRIQUE (PRODUITS N°S 3 ET 5)

Ouverture du tamis Diamètre de la maille (mm)	Pourcentage de particules retenues sur le tamis (en poids)	
	Produit n° 3	Produit n° 5
1,0	1,2	0
0,8	7,8	1,6
0,5	25,4	5,4
0,315	51,2	5,4
0,100	14,0	48,6
Fond	0,4	39,0

3.2. Aptitude à l'inflammation des nuages de poussières

On a vu que pour connaître l'aptitude à l'inflammation des nuages de poussières, les deux déterminations suivantes sont à effectuer :

- mesure de l'énergie minimale d'inflammation par étincelle électrique,
- mesure de la température d'auto-inflammation.

Energie minimale d'inflammation par étincelle électrique

L'essai porte sur la détermination de l'énergie minimale d'inflammation, effectuée au tube de Hartmann (fig. 3), avec une étincelle de décharge d'énergie variable de 0 à 1 200 MJ. S'il se produit une inflammation, il n'est pas nécessaire d'entreprendre les essais suivants.

Remarques :

- Un deuxième essai, à mettre éventuellement en œuvre ensuite, se rapporte à la détermination de l'énergie d'inflammation d'une « trainée » de poussière (5x5x150 mm) par une bobine de Ruhmkorff

déterminant une énergie de 500 MJ. Si la poussière n'est pas susceptible d'être enflammée par une décharge électrostatique, il n'est pas nécessaire d'entreprendre l'essai suivant.

- Un troisième essai, à mener à bien si nécessaire, concerne la détermination de l'énergie minimale d'inflammation d'une « trainée » de poussière (5x5x150 mm) par une étincelle de décharge d'énergie variable de 0 à 1 200 MJ.

a) Mode opératoire de l'essai au tube de Hartmann

L'examen du risque d'inflammation des six poussières en nuage a été fait avec un inflammateur à étincelle électrique de type Hartmann. Dans cet appareil, on fait jaillir une étincelle électrique entre deux électrodes au sein d'un nuage de poussières soulevées par un jet d'air et on note s'il se produit ou non une inflammation. Si, pour une quantité de poussières donnée, on répète l'essai en faisant varier l'énergie mise en jeu, on constate qu'il existe une énergie limite au-dessous de laquelle l'inflammation ne se produit plus. En pratique, l'énergie limite retenue pour caractériser le risque d'inflammation par étincelle est celle qui donne, dans l'appareil, une probabilité d'inflammation de 5 %.

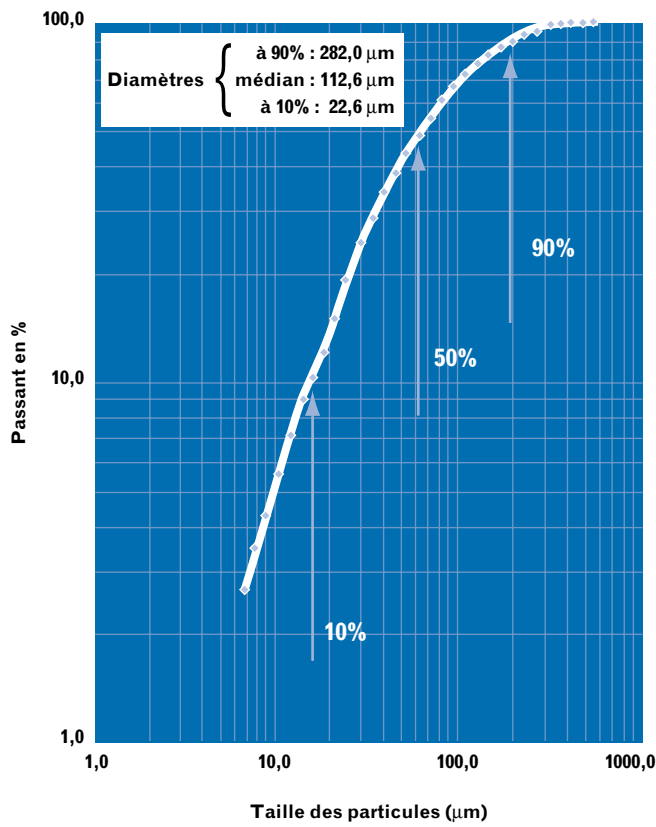
TABLEAUX VII à X

ANALYSE GRANULOMÉTRIQUE LASER PAR GRANULOMÈTRE MALVERN 2600 C

Ces tableaux montrent les résultats de l'analyse granulométrique laser (selon [7]), en les présentant également sous forme de graphiques (pourcentages cumulés, pour les produits n^{os} 1, 2, 4 et 6).

TABLEAU VII

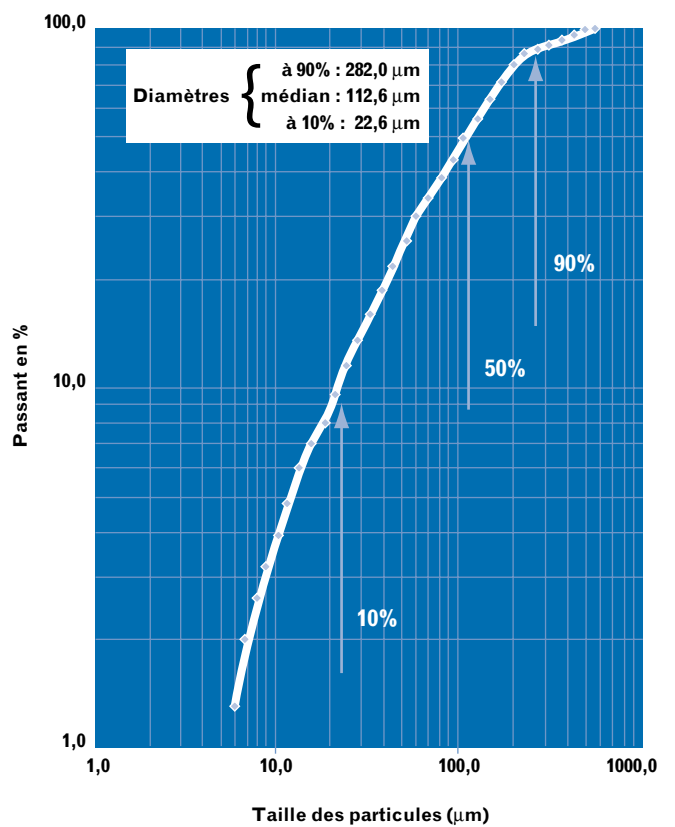
PRODUIT N° 1 (POUSSIÈRES DE MATIÈRES PLASTIQUES)



Taille (µm)	564,0	487,0	420,0	362,0	312,0	270,0	233,0	201,0
Passant (% volumique)	100,0	99,8	99,3	98,3	97,0	95,3	93,1	90,3
	173,0	149,0	129,0	111,0	95,9	82,7	71,4	61,6
	86,9	82,6	77,9	72,7	67,5	61,7	55,4	49,3
	53,1	45,8	39,5	34,1	29,4	25,4	21,9	18,9
	43,9	38,5	33,2	28,7	24,0	19,0	14,7	11,9
	16,3	14,1	12,1	10,5	9,0	7,8	6,7	5,8
	10,4	9,1	7,1	5,5	4,3	3,5	2,7	1,8

TABLEAU VIII

PRODUIT N° 2 (POUSSIÈRES DE LIÈGE)



Taille (µm)	564,0	487,0	420,0	362,0	312,0	270,0	233,0	201,0
Passant (% volumique)	100,0	99,2	97,2	94,5	91,7	89,4	85,9	79,7
	173,0	149,0	129,0	111,0	95,9	82,7	71,4	61,6
	71,7	63,6	56,3	49,4	43,4	38,3	33,8	29,8
	53,1	45,8	39,5	34,1	29,4	25,4	21,9	18,9
	25,9	22,2	18,9	16,2	13,8	11,6	9,6	8,1
	16,3	14,1	12,1	10,5	9,0	7,8	6,7	5,8
	7,0	6,0	4,8	3,9	3,2	2,6	2,0	1,3

TABLEAUX VII à X

ANALYSE GRANULOMÉTRIQUE LASER PAR GRANULOMÈTRE MALVERN 2600 C

(suite)

TABLEAU IX

PRODUIT N° 4 (POUSSIÈRES DE BOIS RECONSTITUÉ)

TABLEAU X

PRODUIT N° 6 (POUSSIÈRES DE FIBRES DE CARBONE)

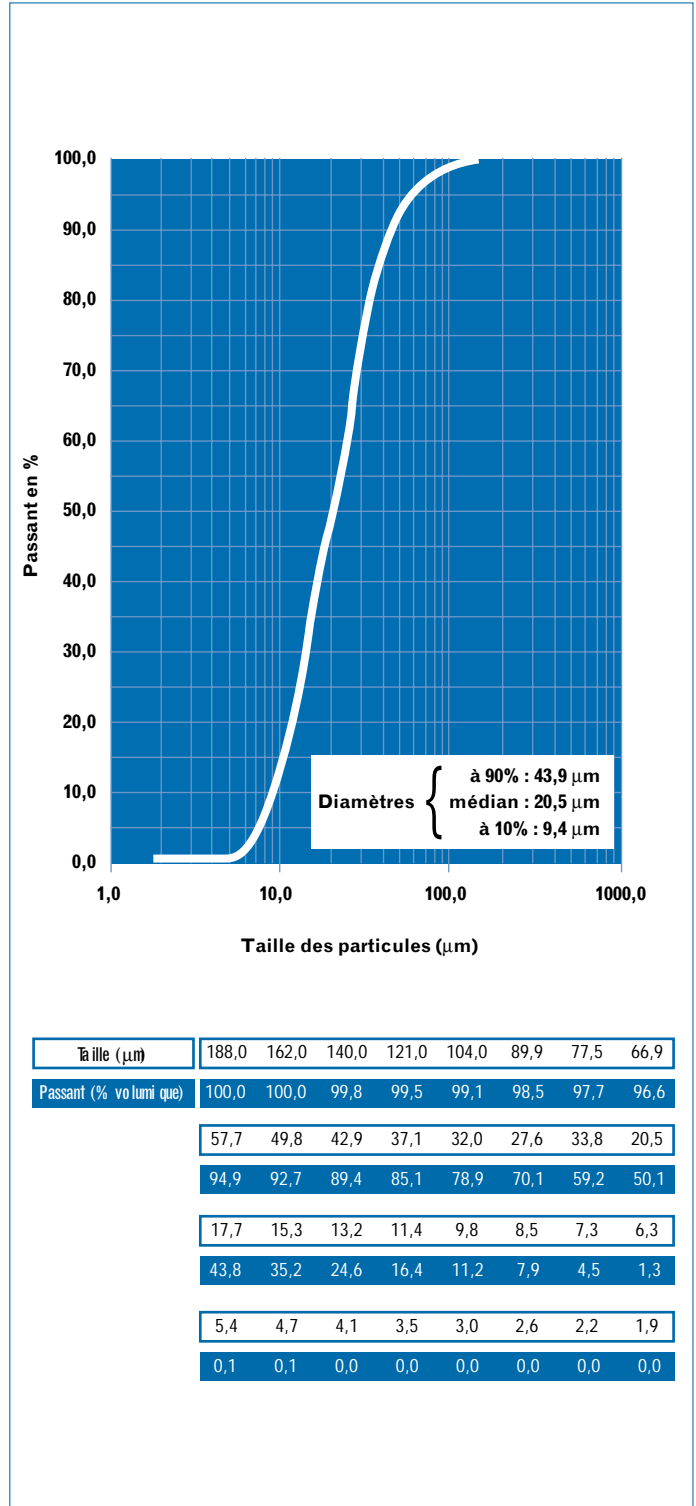
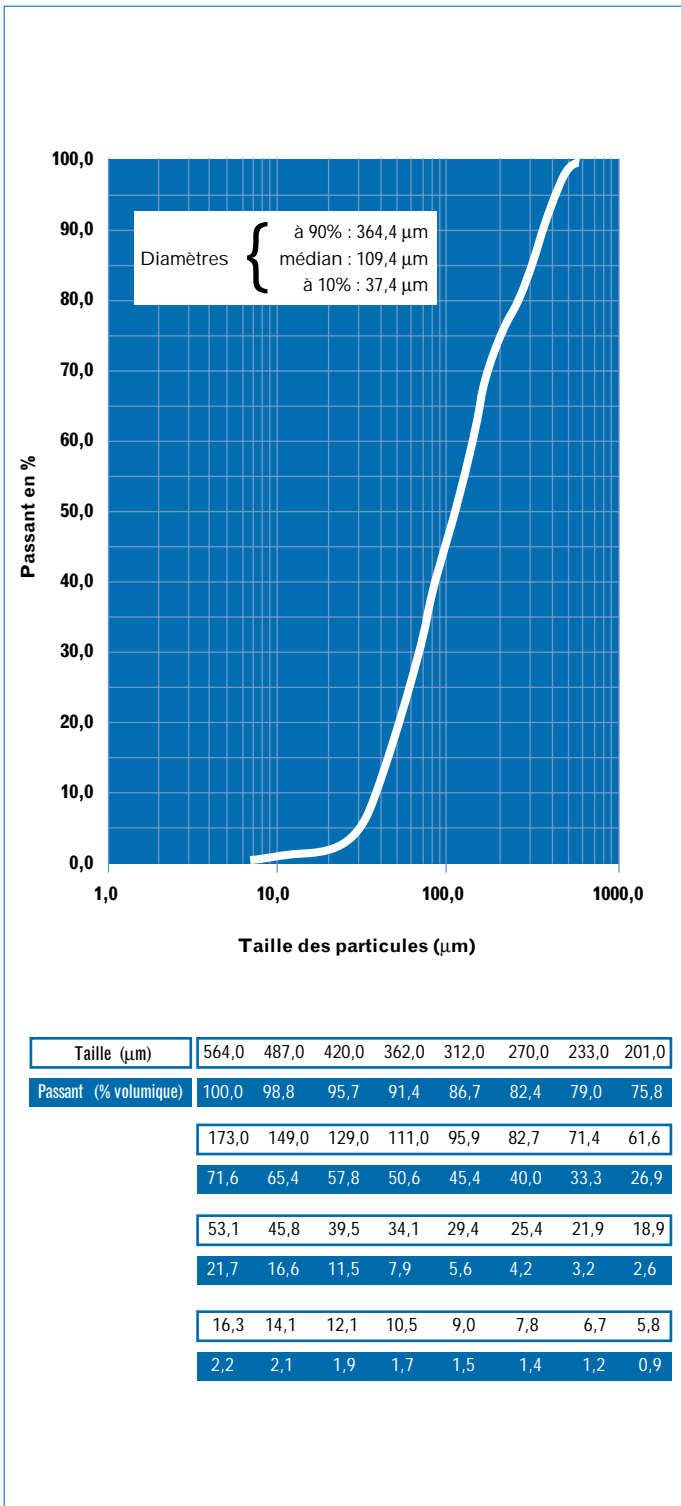


TABLEAU XI

RÉSULTATS DES ESSAIS D'INFLAMMATION (TUBE DE HARTMANN)

Capacité sous 300 volts (μ F)	Energie (mJ)	Fréquence d'inflammation en % sur 20 essais					
		Prod. n° 1	Prod. n° 2	Prod. n° 3	Prod. n° 4	Prod. n° 5	Prod. n° 6
0,13	5,9	—	—	—	—	—	—
0,17	7,6	—	—	—	—	—	—
0,21	9,4	—	—	—	—	—	—
0,27	12	—	—	—	—	—	—
0,36	16	—	—	—	—	—	—
0,47	21	0	—	—	—	—	—
0,60	27	10	—	—	—	—	—
0,80	36	10	0	—	—	—	—
1,0	45	10	10	—	—	—	—
1,3	58	15	20	—	—	—	—
1,7	77	45	70	—	—	—	—
2,3	105	65	80	—	—	—	—
3,5	158	80	90	0	—	—	—
5	225	—	100	15	—	—	—
8	360	—	—	40	—	—	—
12	540	—	—	55	—	—	—
18	810	—	—	65	—	0	—
27	1 200	—	—	95	0	10	0
E_{5%} (mJ)		23	40	170	> 1 200	1 200	> 1 200

Cette énergie est notée E_{5%} dans la suite du texte.

La loi donnant pour une poussière la probabilité d'inflammation en fonction du logarithme de l'énergie est en général une loi normale. Aussi, pour des raisons de commodité, les énergies réalisables en pratique sont échelonnées suivant une progression sensiblement géométrique.

L'énergie maximale utilisable dans l'appareil est de 1 200 millijoules.

b) Résultats expérimentaux

Les résultats obtenus en opérant dans l'air avec un poids de produit égal à 1 ou 2 g par essai et un délai d'inflammation de 0,3 s par rapport au début du soulèvement sont regroupés dans le tableau XI. La lecture du tableau permet de déterminer une valeur de l'énergie minimale d'inflammation pour chacun des produits examinés. On constate que ces valeurs sont très différentes entre elles. Les six échantillons peuvent être classés en quatre catégories.

■ ■ **Produit considéré comme très facilement inflammable** par étincelle d'origine électrique ou électrostatique (E_{5%} dans l'air < 50 mJ). C'est le cas du produit n° 1 et du produit n° 2 qui donnent des valeurs de E_{5%} dans l'air respectivement égales à 23 et 40 mJ.

■ ■ **Produit considéré comme facilement inflammable** par étincelle d'origine électrique ou électrostatique. Le produit n° 3 examiné (cellulose) qui donne dans l'air une valeur de E_{5%} égale à 170 mJ appartient à cette catégorie.

■ ■ **Produit considéré comme moyennement inflammable** par étincelle d'origine électrique ou électrostatique. C'est le cas du produit n° 5 qui ne s'enflamme dans l'air que pour des énergies égales à 1 200 MJ. Pour le produit n° 4, il n'a pas été obtenu d'inflammation avec l'étincelle unique de 1 200 MJ, mais en utilisant un train d'étincelles produit par une bobine de Ruhmkorff dont chaque étincelle a une énergie unitaire de 500 MJ claquant toutes les 15 +/- 2 ms, il a été possible d'enflammer facilement le nuage de poussières (10 inflammations sur 10 essais). Il peut être classé dans cette catégorie.

■ ■ **Produit considéré comme difficilement inflammable** par étincelle d'origine électrique ou électrostatique. Le produit n° 6 qui ne s'enflamme ni dans l'air avec l'étincelle de 1 200 MJ, ni avec la bobine de Ruhmkorff, doit être considéré comme particulièrement difficile à enflammer par des étincelles électriques.

Température d'auto-inflammation

L'essai de caractérisation du risque d'inflammation par des sources d'inflammation autres que les décharges électrostatiques

comprend principalement la détermination de la température d'auto-inflammation d'un nuage de poussières par la méthode du four de Godbert-Greenwald, normalisée CEI [1,5,8].

L'ÉNERGIE MINIMALE D'INFLAMMATION (EMI)

Définition retenue par la norme internationale CEI 1241-2-3 [8] :

L'énergie minimale d'inflammation (EMI) est comprise entre la plus forte énergie E₁ à laquelle l'inflammation ne se poursuit pas lors d'au moins 20 essais successifs pour tenter d'enflammer le mélange poussière/air et la plus faible énergie E₂ à laquelle l'inflammation se produit au cours de 20 essais successifs.

$$E_1 < \text{EMI} < E_2$$

Selon cette définition, les résultats des EMI pour les 6 produits étudiés seront :

Produit n° 1 : 21 mJ < EMI < 27 mJ

Produit n° 2 : 36 mJ < EMI < 45 mJ

Produit n° 3 : 158 mJ < EMI < 225 mJ

Produit n° 4 : 1 200 MJ < EMI

Produit n° 5 : 810 mJ < EMI < 1 200 MJ

Produit n° 6 : 1 200 MJ < EMI

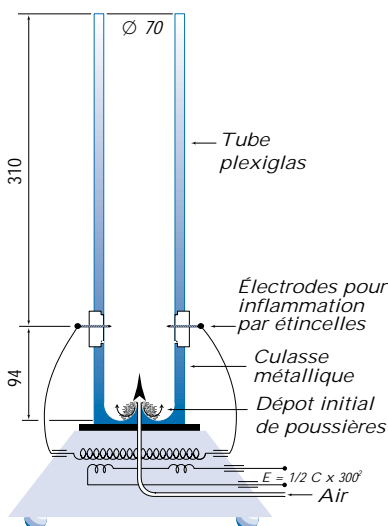


Fig. 3. Inflammateur à étincelle de type Hartmann

a) Mode opératoire

L'appareil utilisé pour cette mesure est un four type Godbert-Greenwald (fig. 4) dans lequel une certaine quantité de poussières (0,15, 0,30 et 0,60 g) est injectée par un jet d'air comprimé (500 cm³ sous 0,15, 0,3 et 0,5 bar). La température est mesurée par un thermocouple placé au contact de la paroi du four à mi-distance des extrémités du four.

On fait varier les températures par paliers espacés au maximum de 20 °C pour les températures supérieures à 300 °C et par paliers espacés de 10 °C pour les températures inférieures à 300 °C.

La température d'auto-inflammation est la plus faible température pour laquelle se produit au moins une inflammation dans dix essais successifs.

b) Résultats expérimentaux

Tous les résultats obtenus sont consignés dans le tableau XII. Avec la définition indi-

quée plus haut, on trouve une valeur de la température d'auto-inflammation du nuage de poussières égale à :

- 420 °C pour le produit n° 1 (polypropylène),
 - 440 °C pour les produits nos 3, 4 et 5,
 - 460 °C pour le produit n° 2.
- Pour le produit n° 6 (fibres de carbone), la température d'auto-inflammation des nuages sera supérieure à 900 °C, température maximale atteinte par le four utilisé.

3.3. Violence d'explosion

Essais en chambre fermée de 20 litres dans l'air à la température ambiante

Pour caractériser la violence de l'explosion des nuages de poussières, l'essai de la méthode dite de la sphère de 20 litres permet de déterminer la concentration mini-

male d'explosion, la concentration engendrant l'explosion la plus violente, la pression maximale d'explosion et la vitesse de montée en pression.

Les résultats obtenus lors de cet essai permettent de calculer les surfaces d'événements d'explosion d'une installation dont on connaît le volume, la forme, la résistance mécanique [9].

Le but de ces essais étant avant tout de caractériser la violence d'explosion en fonction de la concentration du nuage de poussières, la surpression maximale d'explosion et la vitesse maximale de montée en pression ont été mesurées.

a) Mode opératoire

La chambre sphérique de 20 litres (fig. 5), réalisée en acier inoxydable, possède une double enveloppe qui permet par circulation d'un fluide de maintenir une température constante pour tous les essais. Une certaine quantité de la poussière à étu-

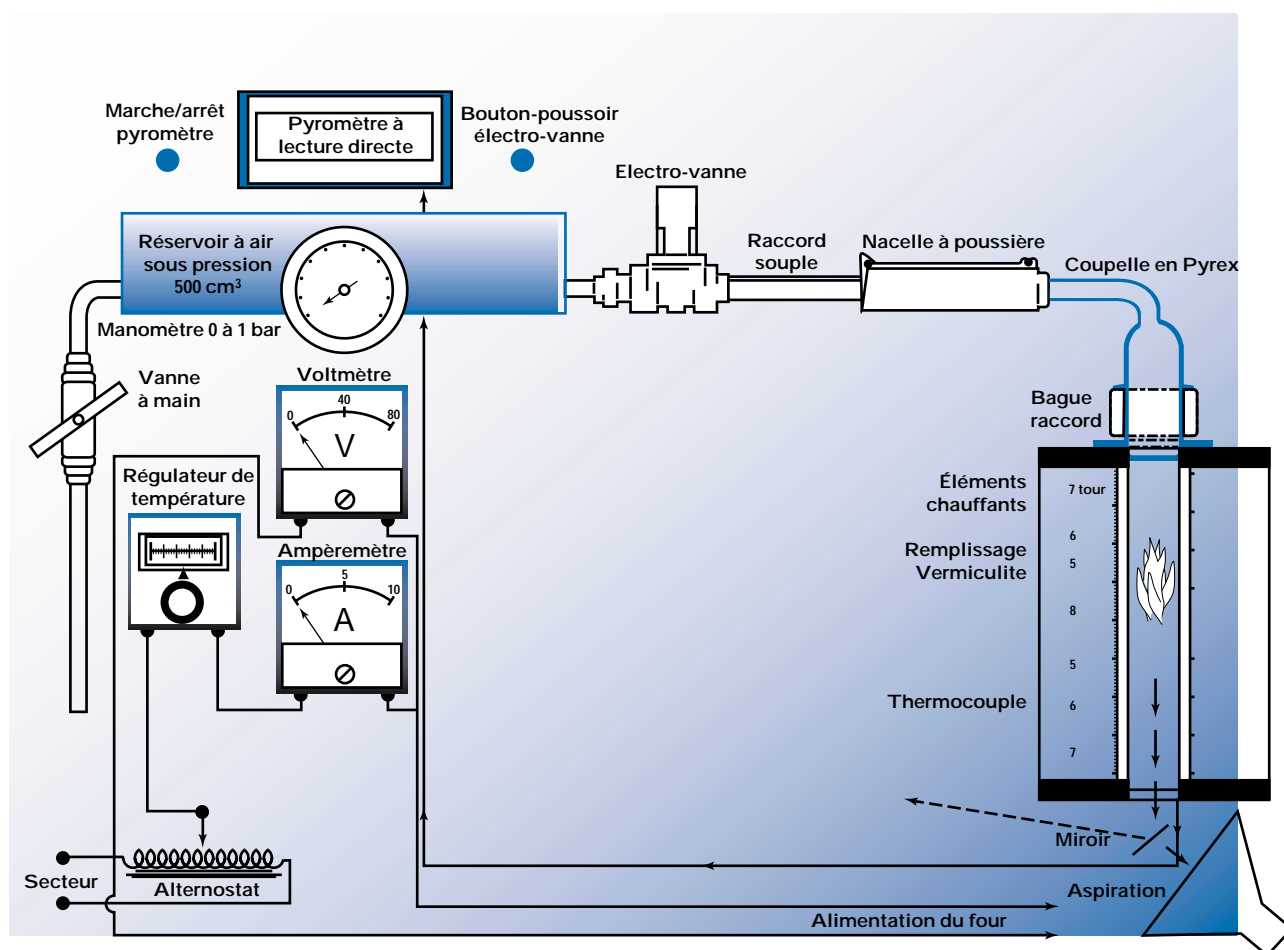


Fig. 4. Four de type Godbert-Greenwald

TABLEAU XII

RÉSULTATS DES ESSAIS D'INFLAMMATION (FOUR TYPE GODBERT-GREENWALD)

Produits	Temp. du four (°C)	Nombre d'inflammations (sur 10 essais sauf indication contraire) Quantité de poussières P (g) et pression de pulvérisation p (bar)								
		P = 0,15 g			P = 0,3 g			P = 0,6 g		
		p (bar) =			p (bar) =			p (bar) =		
		0,15	0,3	0,5	0,15	0,3	0,5	0,15	0,3	0,5
n° 1	460					10/10				
	440					10/10				
	420					10/10				10/10
	400	0/10	0/10	0/10	0/10	0/10	0/10	0/10	0/10	0/10
n° 2	480					10/10				
	460					10/10				
	440					0/10				
	420	0/10	0/10	0/10	0/10	—	0/10	0/10	0/10	0/10
n° 3	480					10/10				
	460					3/10				
	440					2/10				
	420	0/10	0/10	0/10	0/10	0/10	0/10	0/10	0/10	0/10
n° 4	480					10/10				
	460					10/10				
	440					10/10				
	420	0/10	0/10	0/10	0/10	0/10	0/10	0/10	0/10	0/10
n° 5	480					10/10				
	460					10/10				
	440					10/10				
	420	0/10	0/10	0/10	0/10	0/10	0/10	0/10	0/10	0/10
n° 6	900	0/10	0/10	0/10	0/10	0/10	0/10	0/10	0/10	0/10

dier contenue initialement dans un réservoir de 1 litre de capacité est pressurisée à l'air sous 20 bars. Cette poussière est mise en suspension dans la chambre à l'aide d'un pulvérisateur par le jet d'air comprimé du réservoir.

Avant la dispersion de la poussière, on réalise un vide partiel dans la chambre de manière à obtenir une pression de 0,4 bar absolu. Cette opération permet d'obtenir la pression atmosphérique dans la chambre après dispersion de la poussière par la vidange du réservoir.

Le nuage de poussières est enflammé au centre de la chambre, 0,06 s après le début de la pulvérisation, par la combustion de deux allumeurs chimiques ayant une énergie unitaire de 5000 joules.

Les valeurs de la surpression maximale d'explosion P_{max} et de la vitesse maximale de montée en pression : $VMP = (dp/dt)$, sont déterminées sur les enregistrements de la courbe pression-temps conformément à la figure 2.

Ces valeurs dépendent de la concentration du nuage de poussières et du degré de

TABLEAU XIII

ESSAIS EN CHAMBRE FERMÉE : VALEURS DE P_{MAX} ET VMP LES PLUS ÉLEVÉES

Produits	Mesures de P_{max} et VMP	Concentration du nuage de poussières (g. m ⁻³)								
		100	250	500	750	1 000	1 250	1 500	1 750	2 000
n° 1	P_{max} (bar)	2,4	5,8	6,8	6,3	5,9	5,9	5,8	4,5	
	VMP (bar. s ⁻¹)	90	170	330	280	280	280	270	200	
n° 2	P_{max} (bar)	2,9	4,7	7,6	8,0	8,4	8,3	8,2	8,2	7,6
	VMP (bar. s ⁻¹)	110	310	420	570	610	580	560	550	480
n° 3	P_{max} (bar)	1,7	5,9	7,9	8,2	8,0	8,0	—	—	—
	VMP (bar. s ⁻¹)	20	390	460	500	500	480	—	—	—
n° 4	P_{max} (bar)	3,2	5,6	7,1	7,3	7,2	7,2	7,1	6,7	6,7
	VMP (bar. s ⁻¹)	40	100	170	260	250	245	235	210	210
n° 5	P_{max} (bar)	0,7	3,2	5,3	6,8	7,2	7,3	6,7	6,2	6,3
	VMP (bar. s ⁻¹)	15	85	95	170	230	205	210	190	190
n° 6	P_{max} (bar)	2,8	6,3	5,1	4,3	3,6	2,9	—	—	—
	VMP (bar. s ⁻¹)	40	155	90	65	45	25	—	—	—

turbulence. Notons que le délai d'inflammation égal à 0,06 s caractérise un état de turbulence moyennement forte.

C'est pour la concentration (en g. m⁻³) du nuage de poussières qui donne la valeur la plus élevée de VMP , exprimée en bar. s⁻¹,

qu'on détermine la valeur de la constante K_{max} exprimée en bar.m.s⁻¹, rapportée au volume de 1 m³. Pour cela, on admet la validité de la loi cubique (cf. § 2.3) :

$$K_{max} = VMP \cdot V^{1/3} \text{ avec } V = 0,020 \text{ m}^3.$$

TABLEAU XIV

DÉTERMINATION DES P_{MAX} , VMP ET K_{MAX}

	Produits :					
	n° 1	n° 2	n° 3	n° 4	n° 5	n° 6
P_{max} (bar)	6,8	8,4	8,2	7,3	7,3	6,3
VMP (bar. s ⁻¹)	330	610	500	260	230	155
K_{max} (bar.m.s ⁻¹)	89	165	135	70	62	42
Classe d'explosion selon VDI 3673 [10]	St 1	St 1	St 1	St 1	St 1	St 1

Les six produits examinés sont susceptibles de donner des explosions dans l'air sous forme de nuage de poussières. Suivant la directive allemande VDI 3673 [10], tous les produits testés appartiennent à la classe d'explosion St 1 :

$$0 < K_{max} \text{ (ou } K_{St}) < 200 \text{ bar.m.s}^{-1}.$$

3.4. Stabilité thermique des dépôts de poussières de faible épaisseur

Pour évaluer l'inflammabilité des dépôts de poussières de faible épaisseur, l'essai de caractérisation du risque d'inflammation par des sources d'inflammation autres que les décharges électrostatiques comprend la détermination de la température d'auto-inflammation d'un dépôt de poussières par une analyse thermogravimétrique et une analyse thermique différentielle.

Cet essai permet de définir le domaine des températures où se produisent diverses réactions, notamment les réactions exothermiques susceptibles de conduire à l'inflammation des couches de poussières de faible épaisseur. L'examen de la perte de poids permet de relier les réactions observées à des changements d'état du produit ou des réactions.

a) Mode opératoire

La variation de poids de l'échantillon, placé dans un four chauffé avec une vitesse de chauffage donnée, est suivie à l'aide d'une balance enregistreuse en fonction du temps. Les températures de l'échantillon et d'une substance inerte choisie comme référence sont également enregistrées en fonction du temps.

Les dispositions adoptées permettent de préchauffer le courant de l'atmosphère de balayage (440 Nl. h⁻¹) à la même température que celle du four. Dans ces conditions, en comparant les températures de l'échantillon et du témoin inerte, il est possible de mettre facilement en évidence, de façon semi-quantitative, tout phénomène endo- ou exothermique qui pourrait se produire au cours du chauffage. L'échantillon à examiner, placé dans une nacelle métallique identique à celle du témoin, est introduit dans le four à température ambiante, puis on élève progressivement la température à la vitesse de 5 °C. min⁻¹. On peut ainsi obtenir :

- la courbe Pr/Po (courbe 1) du poids résiduel de l'échantillon rapporté au poids initial en fonction de la température du témoin;

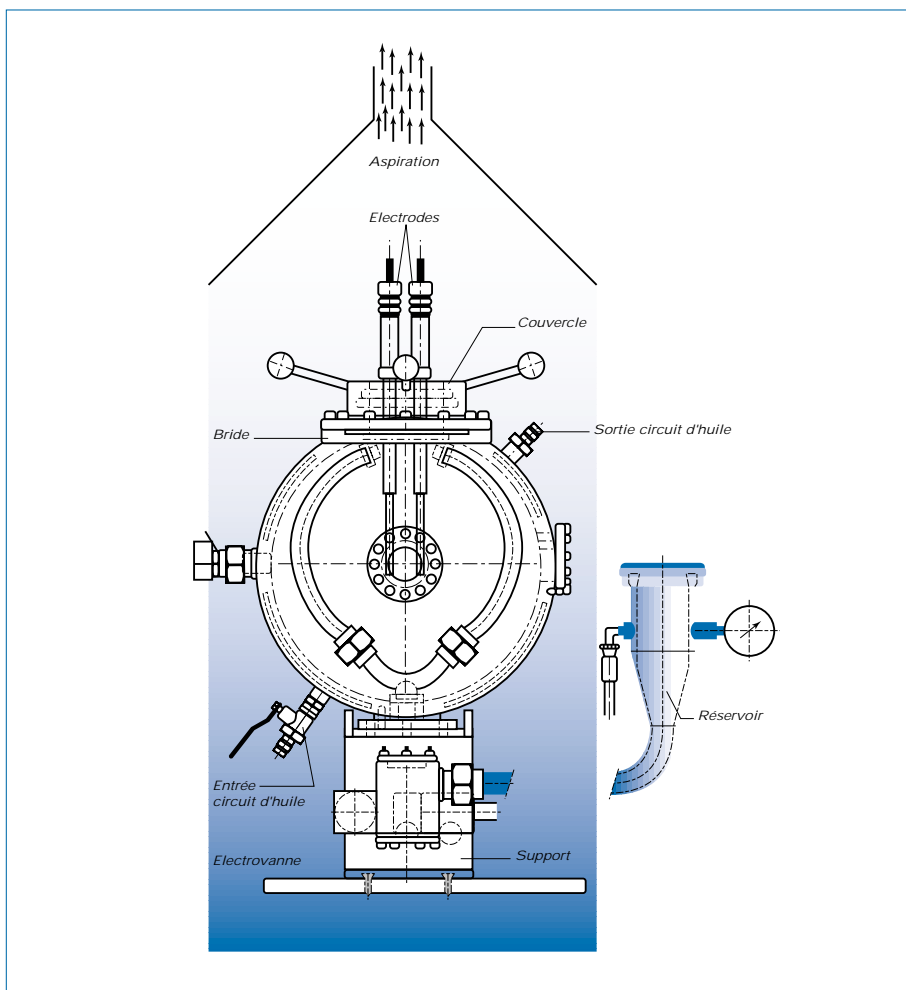


Fig. 5. Chambre sphérique de 20 litres

b) Résultats expérimentaux

N'ont été rassemblées dans le tableau XIII que les valeurs de P_{max} et de VMP les plus élevées obtenues sur deux ou trois essais d'explosion, réalisés pour chacune des concentrations du nuage des poussières étudiées.

Compte tenu de la faible valeur de la densité apparente du produit n° 3 (cellulose),

il n'a pas pu être réalisé d'essais avec des concentrations du nuage de poussières supérieures à 1250 g. m⁻³.

Les valeurs les plus élevées de la surpression maximale d'explosion P_{max} , de la vitesse maximale de montée en pression VMP et de la valeur correspondante de K_{max} , sont données dans le tableau XIV.

- la courbe $\Delta\theta$ (courbe 2) correspondant à la différence de température entre l'échantillon et le témoin en fonction de la température du témoin;
- la courbe $d\Delta\theta/dt$ (courbe 3) correspondant à la dérivée de la courbe précédente par rapport à la température du témoin.

b) Résultats expérimentaux

L'ensemble des courbes obtenues par thermoanalyse sous air sec est donné en annexe I.

■ ■ Produit n° 1 : on note une perte de poids rapide (95 %) entre 180 et 380 °C.

Juste avant le démarrage de la réaction exothermique, on remarque une légère réaction endothermique qui semble correspondre à un changement d'état du produit (ramollissement, fusion...).

La réaction exothermique, qui prend naissance à 180 °C, est de faible amplitude. Cette réaction ne devient très violente qu'à partir de 350 °C : elle correspond à la combustion d'une grande partie du produit et provoque une élévation de la température de l'échantillon par rapport à celle du témoin égale à 195 °C.

■ ■ Produit n° 2 : la perte de poids rapide et totale se situe entre 250 et 270 °C.

Le début de la réaction exothermique se situe vers 210 °C. Le pic exothermique dont le maximum se situe vers 260 °C, correspond à la combustion rapide du produit et provoque une élévation importante de la température de l'échantillon par rapport à celle du témoin (+ 435 °C).

■ ■ Produit n° 3 : ce produit a le même comportement dans cet essai de thermoanalyse que le produit précédent. En effet, on constate un emballement de la réaction exothermique qui prend naissance vers 255 °C et qui provoque la combustion presque totale du produit (perte de poids : 93 % dès 292 °C).

L'élévation de la température de l'échantillon par rapport à celle du témoin est également importante (+ 420 °C).

■ ■ Produit n° 4 : les allures des trois courbes de thermoanalyse de ce produit sont similaires à celles obtenues avec les deux produits précédents.

On note seulement une réaction endothermique qui démarre dès l'enfournement de l'échantillon et présente un maximum vers 80 °C. Cette réaction est certainement due au départ de l'eau d'humidité. Il faut atteindre la température de 218 °C pour assister au démarrage de la très violente réaction exothermique qui provoque la combustion complète de l'échantillon. Le sommet du pic exothermique est situé à 255 °C.

A cette température, l'augmentation de la température de l'échantillon atteint la valeur de + 500 °C. A partir de 275 °C, la perte de poids est totale.

■ ■ Produit n° 5 : ce produit est également très oxyréactif vis-à-vis de l'oxygène de l'air.

On note une perte de poids rapide (70 %) au-dessus de 200 °C. Il faut ensuite atteindre la température de 239 °C pour obtenir le démarrage d'une première réaction exothermique qui est aussitôt suivie par une seconde réaction exothermique plus violente que la première. Le second pic exothermique est situé à 255 °C. L'élévation de la température de l'échantillon par rapport à celle du témoin est élevée (+ 450 °C).

■ ■ Produit n° 6 : on note une perte de poids totale entre 600 et 720 °C.

Ce produit réagit à l'oxygène de l'air à des températures élevées. Le démarrage de la réaction exothermique n'a lieu que vers 567 °C. La combustion du produit ne provoque qu'une faible élévation de la température de l'échantillon (+ 250 °C). Le sommet de ce pic exothermique est étalé sur une centaine de degrés.

Les six échantillons examinés se révèlent très oxyréactifs vis-à-vis de l'oxygène de l'air, dans les conditions opératoires. Toutefois le produit n° 6 (fibres de carbone) n'est capable de s'auto-échauffer qu'à des températures relativement élevées (560 °C).

CONCLUSION

L'étude a examiné l'inflammabilité et l'explosivité des nuages et l'inflammabilité des dépôts de six échantillons de produits pulvérulents très différents les uns des autres. Les essais ont montré que les diverses poussières peuvent être caractérisées et différenciées par la batterie de tests retenus :

- caractéristiques physiques,
- aptitude à l'inflammation du nuage de poussières,
- violence de l'explosion (en chambre fermée); surpression maximale d'explosion et vitesse maximale de montée en pression : détermination du K_{max} ,
- aptitude de la couche de poussières à l'inflammation.

Cette batterie de tests, telle que décrite dans le document, est opérationnelle et peut être mise en œuvre pour toute poussière industrielle.

Toute entreprise intéressée par une telle mise en œuvre des essais présentés peut prendre contact avec le service prévention de la CRAM dont elle dépend. On a là, en effet, une batterie de tests qui semble suffisante pour pouvoir fixer des mesures adaptées aux postes de travail.

COURBES OBTENUES PAR THERMOANALYSE : pages suivantes →

BIBLIOGRAPHIE

1. CEI 1241-2-1 - Matériels électriques destinés à être utilisés en présence de poussières combustibles. 2^e partie : Méthodes d'essai. Section 1 : Méthodes de détermination de la température minimale d'inflammation de la poussière. Paris - La Défense, Union technique de l'électricité (UTE), 1994, 61 p.
2. U 54-540 - Bâtiments agricoles et installations de stockage. Sécurité des silos. Atténuation des effets des explosions par les événements de décharge. Calcul des surfaces d'événements. Paris - La Défense, AFNOR, déc. 1986, 22 p. (Norme expérimentale).
3. NF EN 26184-1 - Systèmes de protection contre les explosions. Partie 1 : Détermination des indices d'explosion des poussières combustibles dans l'air. Paris - La Défense, AFNOR, juin 1991, 10 p.
4. Brenn- und Explosions- Kenngrößen von Stäuben. Sankt Augustin, Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften, mars 1980 (en allemand).
5. CEI 1241-2-2 - Matériels électriques destinés à être utilisés en présence de poussières combustibles. 2^e partie : Méthodes d'essai. Section 2 : Méthode de détermination de la résistivité électrique des couches de

poussière. Paris - La Défense, Union technique de l'électricité (UTE), 1993, 17 p.

6. NF EN 60529 - Degrés de protection procurés par les enveloppes (code IP). Paris - La Défense, AFNOR, oct. 1992, 46 p.

7. NF X 11-666 - Granulométrie. Analyse granulométrique des poudres. Méthode par diffraction. Paris - La Défense, AFNOR, sept. 1984, 11 p.

8. CEI 1241-2-3 - Matériels électriques destinés à être utilisés en présence de poussières combustibles. 2^e partie : Méthodes d'essai. Section 3 : Méthode de détermination de l'énergie minimale d'inflammation des mélanges air/poussières. Paris - La Défense, UTE, 1994, 38 p.

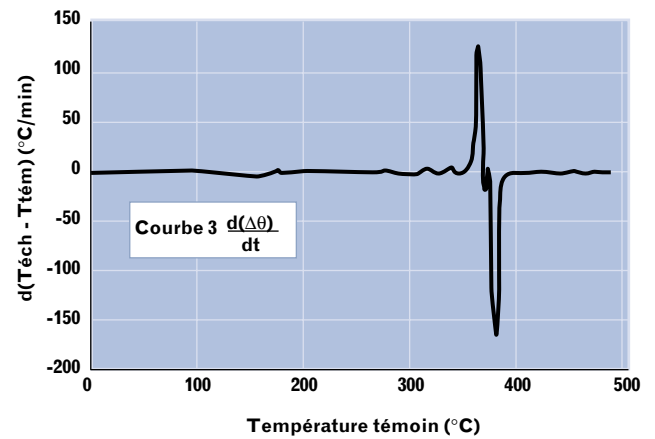
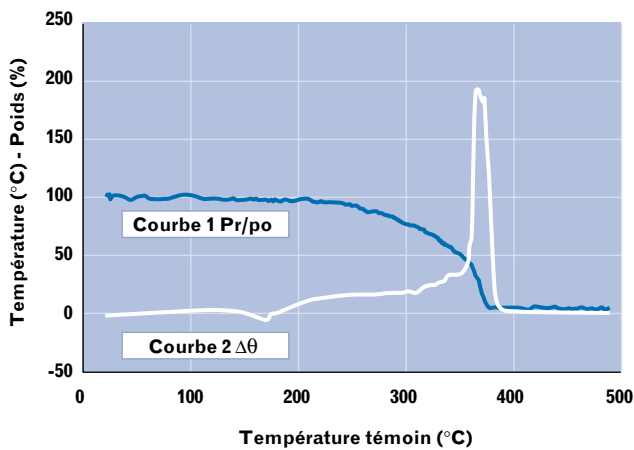
9. Les mélanges explosifs. Paris, INRS, 1994, ED 335, 148 p.

10. Richtlinie VDI 3673 - Druckenlastung von Staubexplosionen (Explosions de poussières : dispositifs d'événements). Düsseldorf, Verein Deutscher Ingenieure, juin 1979, 16 p. (traduction française éditée par l'AFNOR).

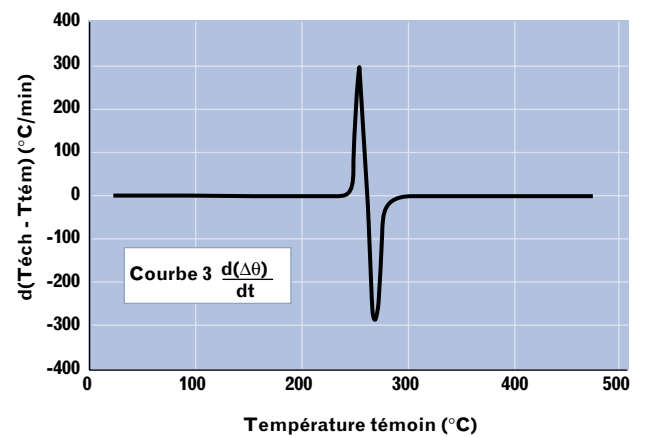
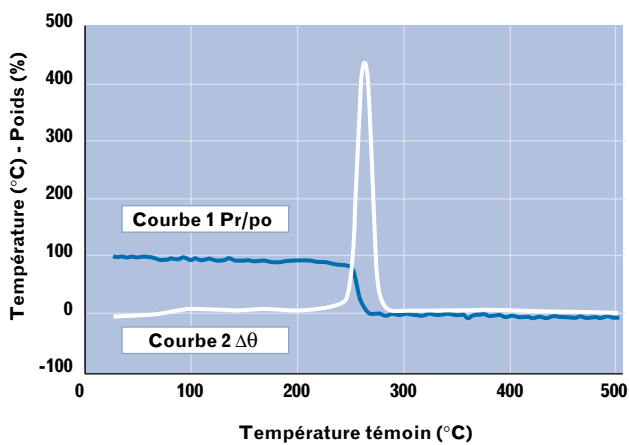
ANNEXE I

COURBES OBTENUES PAR THERMOANALYSE

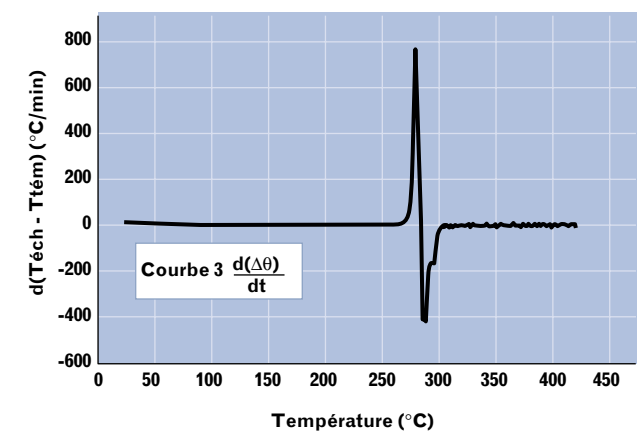
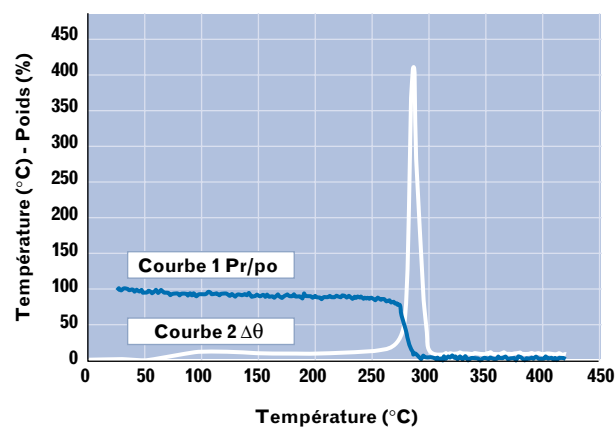
Produit n° 1 : poussières de polypropylène < 315 µm (Po = 0,4695 g)



Produit n° 2 : poussières de liège < 315 µm (Po = 0,2924 g)



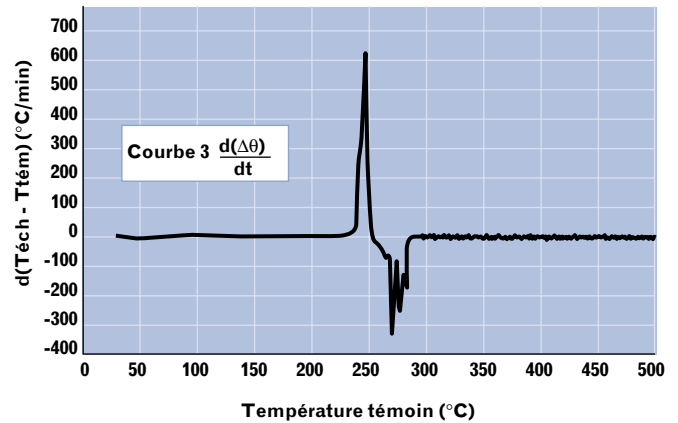
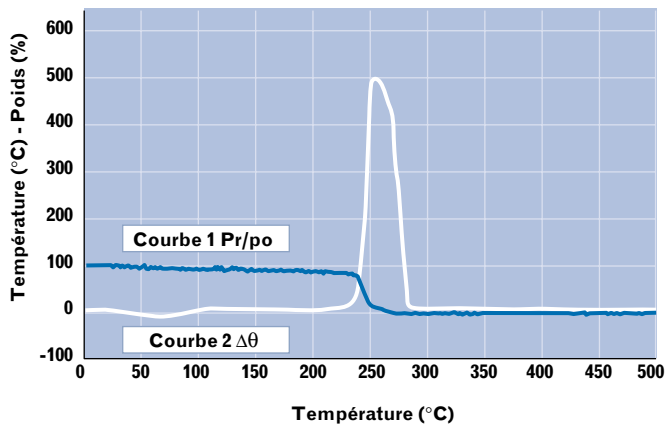
Produit n° 3 : poussières de cellulose (Po = 0,4376 g)



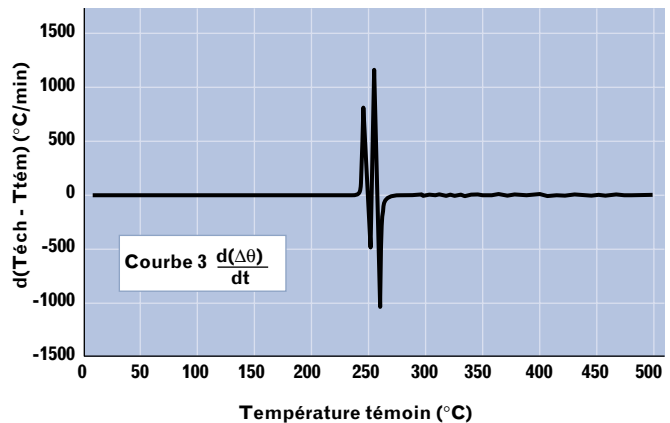
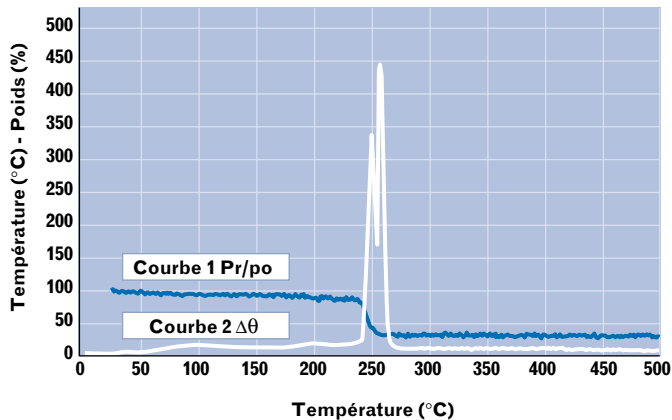
ANNEXE I (SUITE)

COURBES OBTENUES PAR THERMOANALYSE

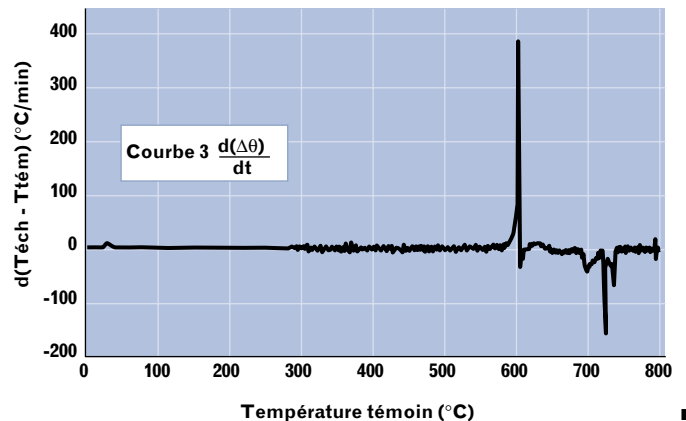
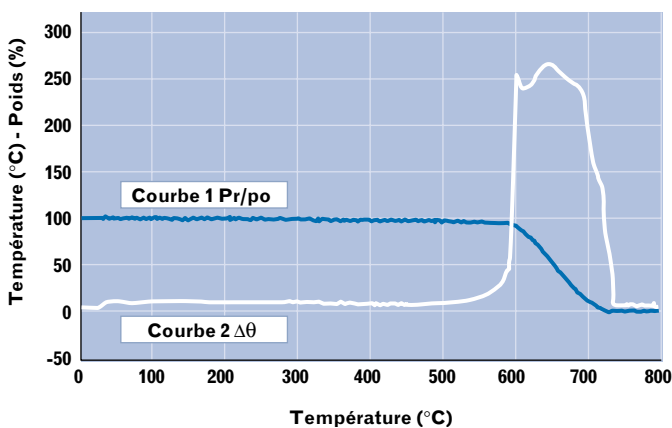
Produit n° 4 : poussières de bois reconstitué (Po = 0,7565 g)



Produit n° 5 : poussières de déchets (Po = 0,4546 g)



Produit n° 6 : poussières de fibres de carbone (Po = 0,1988 g)



INSTITUT NATIONAL DE RECHERCHE ET DE SÉCURITÉ - 30, rue Olivier-Noyer 75680 Paris cedex 14

Tiré à part des Cahiers de notes documentaires - Hygiène et sécurité du travail, 1^{er} trimestre 1998, n° 170 - ND 2070 - 1 200 ex.
N° CPPAP 804/AD/PC/DC du 14-03-85. Directeur de la publication : J.-L. MARIE. ISSN 0007-9952 - ISBN 2-7389-0620-6