



Base de données CARATEX

**GESTIS-CARATEX Poussières - Caractéristiques d'inflammabilité et
d'explosivité des poussières combustibles**

Cette banque de données a été réalisée à partir d'un rapport élaboré conjointement par :

- DMT-Gesellschaft für Forschung und Prüfung mbH, Fachstelle für Brand- und Explosionsschutz über Tage – Bergbau Versuchsstrecke – BVS, Dortmund ;
- Berufsgenossenschaft Nahrungsmittel und Gaststätten – BGN/Forschungsgesellschaft für angewandte Systemsicherheit und Arbeitsmedizin e.V. – FSA, Mannheim ;
- CHEMSAFE – Datenbank für bewertete sicherheitstechnische Kenngrößen der Deutschen Gesellschaft für Chemisches Apparatewesen, Chemische Technik und Biotechnologie e.V. – DECHEMA, Francfort sur le Main / Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung – BAM – Physikalisch-Technische Bundesanstalt / PTB, Braunschweig ;
- Henkel KGaA, TTA-Sicherheitstechnik, Düsseldorf.

Ce rapport a été réalisé avec le soutien financier de la Commission européenne, Direction générale V – Emploi, relations du travail et affaires sociales, Bruxelles et Luxembourg.

Rédacteurs :

- H. Beck, N. Glienke, C. Möhlmann
- Berufsgenossenschaftliches Institut für Arbeitssicherheit – BIA

Editeur :

- Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften (HVBG)
Alte Heerstrasse 111, D – 53757 Sankt Augustin
Tél. : +49 2241 231 – 01
Fax : +49 2241 231 – 1333
Internet : <http://www.hvbg.de>



Base de données CARATEX

Version : 2/2001

■ Introduction

La prévention des risques liés à l'emploi ou à la formation de produits solides combustibles finement divisés (poudre, farine, par exemple) nécessite de connaître les propriétés de ces produits qui ont une incidence sur la sécurité, à savoir leurs effets sur la santé et leurs caractéristiques d'inflammabilité et d'explosivité. Plus l'on dispose de données sur les risques d'inflammation et d'explosion liés à un produit, mieux il est possible d'adapter et d'affiner les mesures de prévention.

Dès la fin des années 1970, un projet de recherche portant sur la détermination des caractéristiques d'inflammabilité et d'explosivité de poussières représentatives a été programmé et mené à bien, en collaboration avec le laboratoire d'essai des mines *Bergbau-Versuchsstrecke (BVS)* et avec le soutien financier de la Fédération des caisses allemandes d'assurance accidents (*Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften*). Les résultats ont été publiés en 1980 [1].

Dans ce cadre ont été déterminées les caractéristiques de plus de 800 poussières et produits pulvérulents. Bien que toutes les caractéristiques de sécurité ne soient pas indiquées pour chaque produit, ces données ont constitué pour la prévention de terrain un outil important d'aide à la décision, et ont été particulièrement utiles aux services de prévention et d'inspection du travail.

En raison de l'intérêt manifesté par un large public, ces données ont été reprises dans le manuel de l'Institut de prévention des caisses allemandes d'assurance accident (*BIA Handbuch*). Les données provenant du BVS et du BIA ont été complétées par celles du laboratoire de la Caisse allemande d'assurance accidents pour l'alimentation et la restauration (*Berufsgenossenschaft Nahrungsmittel und Gaststätten, BGN*), et cette deuxième édition comportait les caractéristiques de près de 1900 poussières. Deux nouveaux tableaux fournissaient en outre des informations sur les énergies minimales d'inflammation et les concentrations limites en oxygène [2].

Dans le cadre d'un projet soutenu par la Commission européenne, un très grand nombre de données provenant de divers laboratoires d'essai est venu compléter l'ouvrage, qui comprend aujourd'hui les caractéristiques de près de 4300 échantillons de poussières, disponibles également sous forme de banque de données.

Les organismes suivants ont participé à ce projet :

- *Berufsgenossenschaftliches Institut für Arbeitssicherheit, BIA* (Institut de prévention des caisses

Base de données CARATEX

allemandes d'assurance accident)

■ *DMT-Gesellschaft für Forschung und Prüfung mbH, Fachstelle für Brand- und Explosionsschutz über Tage – Bergbau Versuchsstrecke – BVS, Dortmund (Centre de recherche et d'essais spécialisé dans le domaine de l'incendie-explosion – Installation d'essai pour les mines)*

■ *Berufsgenossenschaft Nahrungsmittel und Gaststätten - BGN/Forschungsgesellschaft für angewandte Systemsicherheit und Arbeitsmedizin e.V. – FSA, Mannheim (Caisse allemande d'assurance accidents du secteur Alimentation-Restauration – BGN/Centre de recherche appliquée sur la sécurité des systèmes et la médecine du travail – FSA)*

■ *CHEMSAFE – Datenbank für bewertete sicherheitstechnische Kenngrößen, Deutsche Gesellschaft für Chemisches Apparatewesen, Chemische Technik und Biotechnologie e.V. – DECHEMA, Frankfurt am Main/Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung – BAM, Berlin/Physikalisch-Technische Bundesanstalt - PTB, Braunschweig (Banque de données CHEMSAFE – DECHEMA/Office fédéral d'essai des matériaux – BAM/Office fédéral de mesures physiques – PTB)*

■ *Henkel KgaA, TTA-Sicherheitstechnik, Düsseldorf (Groupe Henkel KgaA)*

Les méthodes d'essai mises en œuvre pour établir ces caractéristiques sont décrites dans diverses normes nationales et internationales [3 - 6]. La plupart des tests ont été réalisés conformément au Document VDI 2263-1 [3]. Les termes utilisés ont été, dans la mesure du possible, adaptés aux définitions de la norme EN 1127-1 [7].

■ Définitions / Grandeurs caractéristiques

■ **Explosion**

Réaction brusque d'oxydation ou de décomposition entraînant une élévation de température, de pression ou les deux simultanément.

■ **Valeur KSt**

Caractéristique dépendant de la poussière étudiée et de la méthode d'essai, calculée en appliquant la loi cubique. Sa valeur est en relation avec la vitesse maximale de montée en pression dans un réservoir de 1 m³, lors d'essais réalisés selon le document VDI 3673, feuillet 1, et la norme ISO 6184/1.

■ **Loi cubique**

Loi décrivant la relation entre le volume et la vitesse maximale de montée en pression :

$$(dp/dt)_{\max} \cdot V^{1/3} = \text{constante} = K_{St}$$



Base de données CARATEX

■ **Pression maximale d'explosion P_{max}**

Dans des conditions d'essai spécifiées, pression maximale obtenue dans un récipient fermé lors de l'explosion d'une atmosphère explosive.

■ **Vitesse maximale de montée en pression de l'explosion $(dp/dt)_{max}$**

Dans des conditions d'essai spécifiées, valeur maximale de la montée en pression par unité de temps obtenue dans un récipient fermé lors des explosions de toutes les atmosphères explosives dans le domaine d'explosivité de la substance combustible (voir aussi « Loi cubique »).

■ **Médiane**

Valeur de la granulométrie pour laquelle 50 % en poids des poussières ont une granulométrie supérieure et 50 % en poids une granulométrie inférieure.

■ **Energie minimale d'inflammation EMI ou E_{min}**

Plus faible énergie électrique stockée dans une capacité, dans des conditions d'essai spécifiées, qui, lors de la décharge, est juste suffisante pour obtenir l'inflammation du mélange air/poussières le plus inflammable obtenu à partir d'une poussière explosive donnée.

■ **Température minimale d'inflammation d'une couche de poussières de 5 mm d'épaisseur (température d'inflammation en couche)**

Dans des conditions d'essais spécifiées, température la plus faible d'une surface chaude pour laquelle une couche de poussières de 5 mm d'épaisseur est enflammée.

■ **Température minimale d'inflammation d'un nuage de poussières (température d'auto-inflammation) TAI**

Dans des conditions d'essais spécifiées, température la plus faible d'une surface chaude sur laquelle le mélange air/poussière le plus inflammable est enflammé.

■ **Concentration limite ou minimum en oxygène CLO ou CMO**

Dans des conditions d'essais spécifiées, concentration maximale en oxygène d'un mélange d'air, de poussières et d'un gaz inerte dans lequel une explosion ne se produit pas.

■ **Poussière**

Matériau particulaire de forme, structure et densité variables, de granulométrie inférieure à 500 μm environ.

■ **Explosivité/classe d'explosion**

La classe d'explosion des poussières est établie d'après la valeur K_{St} :



Base de données CARATEX

Classe d'explosion	Constante K_{St} en $\text{bar} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
St 1	> 0 à 200
St 2	> 200 à 300
St 3	> 300

■ Mélange air/poussières

Poussières en suspension dans l'air (nuage de poussières). Un mélange air/poussières est caractérisé par la concentration de poussières dans le mélange.

■ Limite inférieure d'explosivité *LIE*

Limite inférieure du domaine de concentrations d'une poussière dans l'air à l'intérieur duquel une explosion peut se produire.

■ Mesures de prévention des explosions de poussières et de protection contre ces explosions et grandeurs à prendre en compte

Les Règles de protection contre les explosions et le document VDI 2263 [8, 3], de même que les nouveaux règlements européens [7, 9, 10], distinguent deux types de mesures :

- Mesures de prévention de l'explosion (visant à éviter la survenue d'une explosion)
- Mesures de protection contre l'explosion (visant à éviter les conséquences dangereuses d'une explosion)

Les mesures de prévention de l'explosion ont pour objet d'empêcher l'explosion en évitant que ne se créent les conditions nécessaires à sa survenue. Si cet objectif ne peut pas être atteint ou nécessiterait des mesures trop complexes ou trop coûteuses, un degré de sécurité similaire peut être assuré par des mesures de protection, touchant à la conception des installations et ayant pour effet de limiter à un niveau non dangereux les conséquences d'une explosion inévitable.

Le choix de ces mesures et le dimensionnement des systèmes de protection supposent la connaissance des caractéristiques d'inflammabilité et d'explosivité des poussières manipulées (tableau 1).

Base de données CARATEX

Mesures de prévention / de protection	Caractéristiques à prendre en compte
Elimination des poussières combustibles	Combustibilité, explosivité
Limitation de la concentration	Limites d'explosivité
Inertage	Concentration limite en oxygène
Elimination des sources d'inflammation	Energie minimale d'inflammation, température d'inflammation, auto-inflammabilité, décomposition exothermique, comportement électrostatique, sensibilité aux chocs, température d'inflammation en couche
Conception résistante aux explosions	Pression maximale d'explosion
Décharge de la pression d'explosion	Valeur K_{St} et pression maximale d'explosion
Suppression de l'explosion	Valeur K_{St} et pression maximale d'explosion

Tableau 1 : Caractéristiques des poussières à prendre en compte selon les mesures de prévention de l'explosion / de protection contre l'explosion

Pour l'application de ces mesures, on se reportera aux directives et publications citées dans la bibliographie, en particulier au document VDI 2263 [3] et à la norme EN 1127-1 [7].

■ Logigramme de la procédure d'essai

Pour évaluer la sécurité des installations et des procédés, il faut impérativement connaître les caractéristiques d'inflammabilité et d'explosivité des produits mis en œuvre. On se fonde d'abord sur leur composition chimique. S'il est exclu que le produit puisse être oxydé, il n'est pas nécessaire de poursuivre les essais. Le produit peut être classé comme non combustible et non explosible.

Si l'oxydabilité est probable ou ne peut pas être exclue, il faut procéder à la détermination expérimentale des caractéristiques d'inflammabilité et d'explosivité du produit. Les données de bases telles que le pouvoir calorifique, par exemple, ne permettent pas, dans l'état actuel des connaissances, de déterminer ces caractéristiques. La figure 1 représente un schéma qui a fait ses preuves, en pratique, pour une étude complète de l'inflammabilité et de l'explosivité des produits [3, 7, 8, 11, 12, 14, 18, 24].

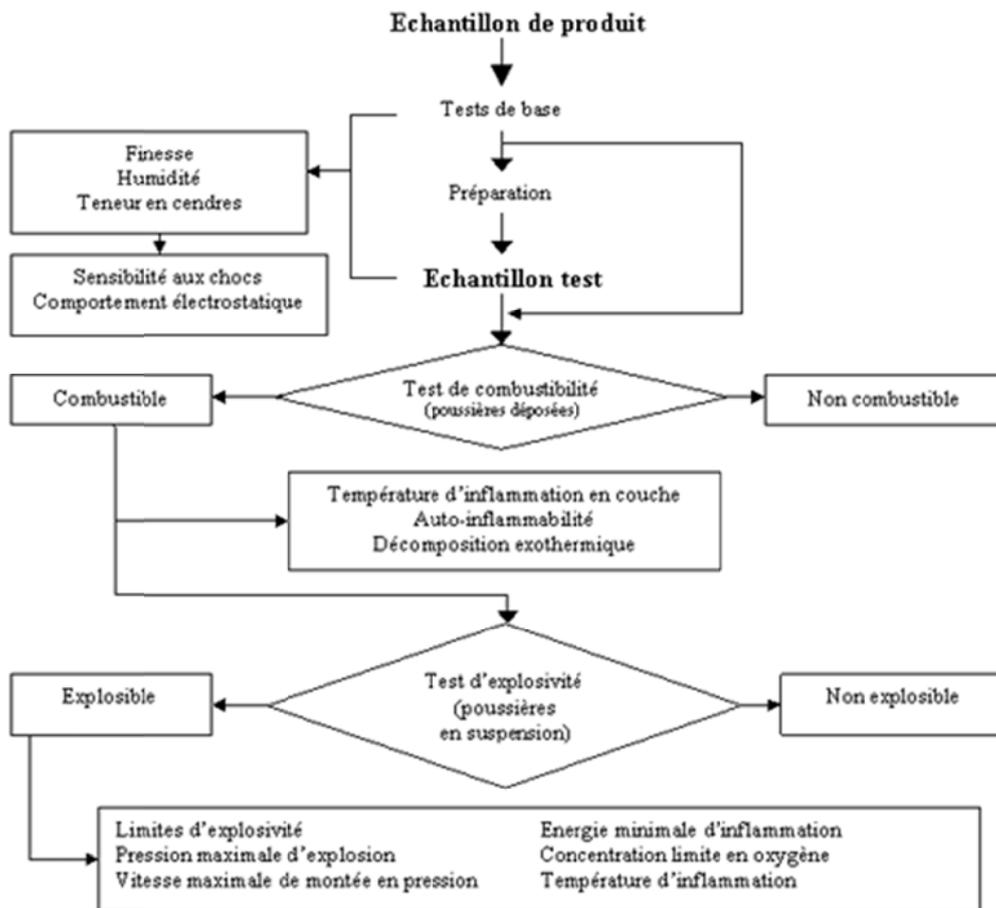


Figure 1 : Logigramme de détermination des caractéristiques d'inflammabilité et d'explosivité des poussières

Il est conseillé de privilégier l'étude des caractéristiques des poussières fines, afin que les résultats s'appliquent aux situations les plus défavorables rencontrées sur le terrain. Cette règle est particulièrement importante dans le cas de processus se traduisant par une modification de la granulométrie ou une augmentation de la part relative des fractions les plus fines (broyage, abrasion, captage, formation de dépôts, par exemple). Pour les poussières déposées, les essais sont généralement réalisés sur la fraction < 250 μm , et pour les poussières en suspension, sur la fraction < 63 μm . Il peut être nécessaire de préparer l'échantillon pour obtenir la granulométrie recherchée.

Selon le problème posé, il peut être également utile, voire nécessaire, de réaliser des tests sur l'échantillon de poussière tel que fourni, sans préparation particulière.

Base de données CARATEX

■ Méthodes de test

Les caractéristiques des poussières sont établies par les méthodes décrites brièvement ci-après.

■ **Granulométrie, médiane**

La granulométrie des poussières est généralement établie par tamisage. Cette méthode consiste à mesurer le poids de matière retenu par des tamis à mailles calibrées. Le résidu de tamisage (en pourcentage pondéral) est porté, dans le diagramme RRSB (selon Rosin-Rammler-Sperling-Bennet), en regard du diamètre des grains, ce qui donne une courbe de répartition sur laquelle on peut lire la granulométrie médiane des poussières étudiées. Cette valeur fournit une évaluation grossière de la granulométrie des poussières. Lorsque le tamisage n'est pas applicable, la granulométrie peut être déterminée par voie humide ou par une méthode optique.

■ **Humidité**

L'humidité du matériau étudié est établie par détermination de la substance sèche qui reste de la substance totale préalablement pesée après un séchage précautionneux jusqu'à masse constante.

■ **Limite inférieure d'explosivité, LIE**

La limite inférieure d'explosivité est établie à partir des essais d'explosion conduits pour déterminer p_{max} et K_{St} (voir ci-après). La limite inférieure d'explosivité peut aussi être évaluée par approximation à partir des résultats d'essais dans le tube de Hartmann modifié.

■ **Pression maximale d'explosion, vitesse maximale de montée en pression, valeur K_{St}**

Des valeurs fiables sont obtenues, pour ces caractéristiques d'explosivité des poussières, lors d'essais réalisés dans un récipient quasi sphérique et de volume ≥ 20 l. Les valeurs indiquées ici résultent d'essais en récipient de 1 m^3 et/ou en sphère de 20 l.

Pour les essais en **récipient de 1 m^3** (figure 2), les poussières sont placées dans un réservoir ($V=5$ l) extérieur à l'enceinte où se déroule l'explosion. La dispersion des poussières dans l'enceinte est généralement assurée au moyen d'un tube perforé de 3/4" de forme semi-circulaire, fixé le long de la paroi intérieure de l'enceinte. Les 20 ou 13 orifices du tube ont un diamètre de 5 ou 6 mm. De l'air comprimé (surpression de 20 bar) introduit dans le réservoir contenant les poussières provoque l'ouverture d'une capsule ou d'une vanne électropneumatique assurant une dispersion rapide de la poussière dans le récipient, afin qu'au moment de l'inflammation, le récipient contienne un mélange air/poussière suffisamment homogène à la concentration voulue.

Le délai d'amorçage, c'est-à-dire le temps écoulé entre le début de l'introduction des poussières dans l'enceinte et le déclenchement de la source d'inflammation, est fixé de façon à obtenir un degré de turbulence donné au moment de l'inflammation. Une turbulence est nécessaire pour maintenir les poussières en suspension, mais elle influe sur le déroulement de l'explosion. Plus le délai est court, plus la turbulence est élevée, ce qui se traduit par une augmentation de la vitesse maximale de

montée en pression et de la pression maximale d'explosion. Toutefois, celle-ci tend vers un maximum qui se trouve être atteint pratiquement au moment où les poussières sont totalement éjectées du réservoir, soit dans un délai de 0,6 s (figure 3). Un délai d'amorçage inférieur à 0,6 s se traduit par une augmentation de la vitesse de montée en pression.

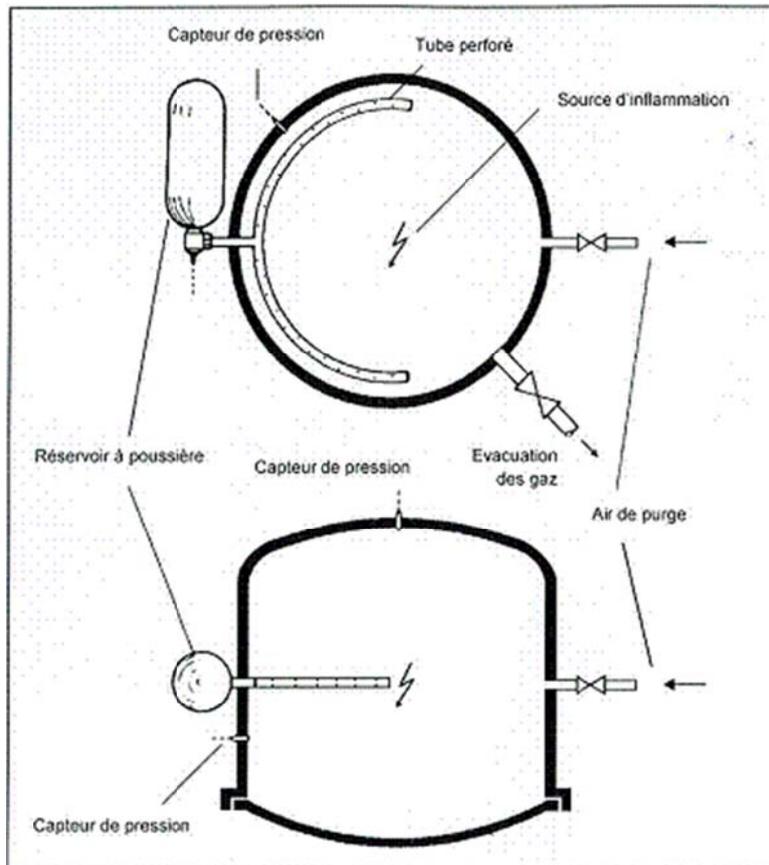


Figure 2 : Schéma du récipient de 1 m³

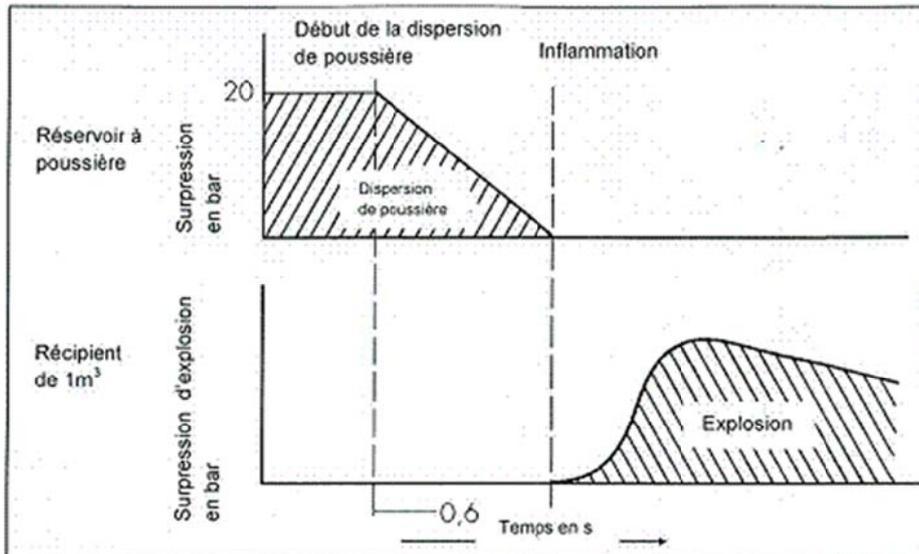


Figure 3 : Déroulement schématisé du test de détermination de l'explosivité des poussières en récipient de 1 m³

Un délai de 0,6 s est donc adopté par convention pour tous les essais. L'inflammation du mélange air/poussières est déclenchée au centre de l'enceinte. La source d'inflammation est généralement constituée de deux détonateurs chimiques totalisant une énergie de 10 000 J. Deux capteurs fixés sur la paroi de l'enceinte enregistrent la pression en fonction du temps pendant l'explosion. Une série d'essais est réalisée en faisant varier la concentration de poussière dans un large domaine et en mesurant les pressions d'explosion et les augmentations de la vitesse de montée en pression. A partir d'une valeur de 500 g/m³, la concentration de poussière est augmentée par paliers de 250 g/m³ ou diminuée de moitié, de proche en proche, jusqu'à ce que la pression maximale d'explosion et la vitesse maximale de montée en pression soient établies. En réduisant encore la concentration selon le même principe, on établit la concentration pour laquelle l'inflammation du mélange air/poussières ne peut pas être obtenue, et ce au cours de trois essais successifs. Cette concentration est définie comme la limite inférieure d'explosivité des poussières.

Pour les essais en **sphère de 20 l**, la méthode et la conception de l'appareillage sont identiques, dans le principe, à celles décrites pour le récipient de 1 m³. Les conditions aux limites sont définies de telle sorte que les résultats soient comparables aux valeurs obtenues dans le récipient de 1 m³.

Outre la taille de l'enceinte, les différences résident principalement dans la nécessité de réaliser un vide partiel dans la sphère avant de procéder aux essais (de telle sorte qu'après introduction des poussières, l'intérieur de la sphère soit à la pression atmosphérique), et dans le délai d'amorçage, qui n'est que de 0,06 s. De plus, l'ensemble du domaine de concentrations est couvert en trois séries d'essais, la pression maximale d'explosion et la vitesse maximale de montée en pression étant

Base de données CARATEX

établies en faisant la moyenne des valeurs maximales des trois séries.

La loi cubique $(dp/dt)_{\max} \cdot V^{1/3} = \text{const} = K_{St}$ permet de calculer la valeur K_{St} (indépendante du volume) à partir de la vitesse maximale de montée en pression. La source d'inflammation est la même que dans le récipient de 1 m^3 , à savoir deux détonateurs chimiques totalisant une énergie de $10\,000 \text{ J}$ [3, 4, 5, 16].

■ Explosivité/classe d'explosion

Une poussière est dite explosive lorsque, après inflammation du mélange air-poussière, la propagation de la flamme s'accompagne, dans un récipient fermé, d'une élévation de la pression. L'explosivité des poussières est déterminée le plus souvent en appareillage fermé, selon les méthodes décrites. Alors que dans le récipient de 1 m^3 , on utilise la même source d'inflammation que pour la détermination des caractéristiques p_{\max} et K_{St} ($EZ = 10 \text{ kJ}$), l'énergie d'inflammation utilisée pour la détermination de l'explosivité dans la sphère de 20 l n'est que de 1 à 2 kJ [3].

Lorsque, au cours de l'essai, la pression n'augmente pas ($Dp < 0,5 \text{ bar}$ par rapport à la pression initiale), la poussière considérée, sous la forme (composition, granulométrie et humidité) soumise à l'essai, est considérée comme **non explosive**. Lorsque l'augmentation de pression dépasse $0,5 \text{ bar}$, la poussière est considérée comme **explosive** en mélange avec l'air.

L'**appareillage de Hartmann modifié** permet dans une certaine mesure de se prononcer sur l'explosivité et la classe d'explosion. Il est constitué (figure 4) d'un tube de verre disposé verticalement, ayant un volume de près de $1,2 \text{ l}$. Le tube est fermé à son extrémité supérieure par un clapet pivotant librement. La poussière soumise au test, placée au fond du tube, est mise en suspension par injection d'air comprimé ($V = 50 \text{ ml}$, $p = 8 \text{ bar}$). Trois séries d'essais permettent de faire varier la quantité de poussière sur un large domaine. Lorsque la source d'inflammation (un circuit créant un arc électrique) ne suffit pas à enflammer le mélange, trois autres séries d'essais sont réalisées avec une source d'inflammation plus puissante (un filament incandescent) [17].

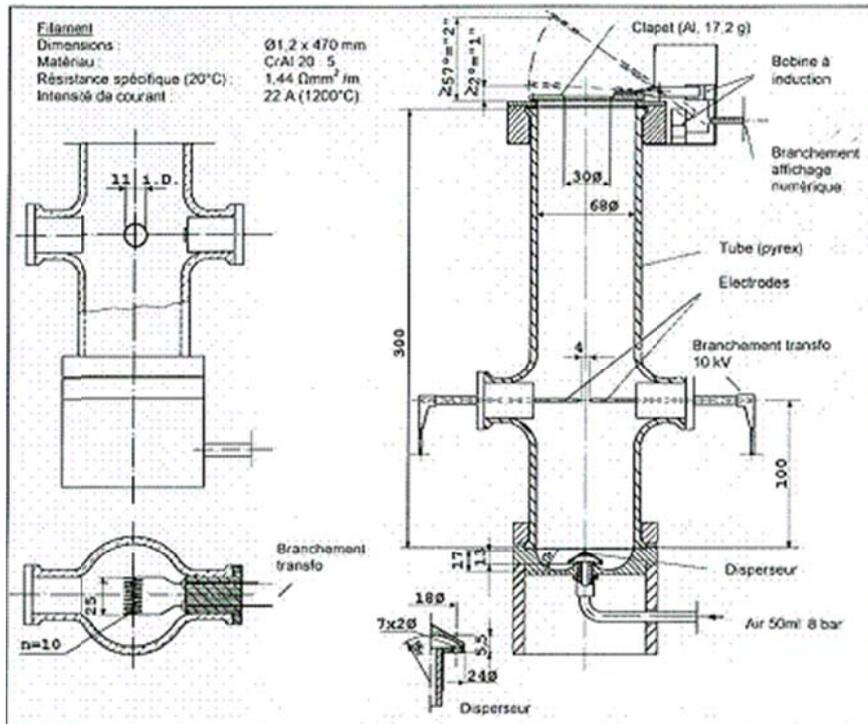


Figure 4 : Schéma de l'appareillage de Hartmann modifié (à gauche, avec un filament incandescent ; à droite, avec un circuit créant un arc électrique)

Le clapet se soulève plus ou moins selon la réaction du mélange air-poussière. L'angle d'ouverture correspondant à la réaction maximale observée, enregistré au moyen d'un capteur à induction, est évalué selon l'échelle suivante :

- ▲ « 0 » (absence de propagation de la flamme à l'ensemble du mélange) signifie seulement que, dans les conditions d'essai décrites, il ne se produit pas d'inflammation. Néanmoins cela ne suffit pas à justifier un classement de la poussière comme non explosive. Des essais complémentaires en appareillage fermé sont nécessaires.
- ▲ « 1 » indique que la poussière est explosive en mélange avec l'air, et permet de la classer dans la **classe d'explosion 1**. Une propagation de la flamme à l'ensemble du mélange, même sans soulèvement du clapet, justifie également le classement en classe d'explosion 1.
- ▲ « 2 » indique également que le mélange est explosif, mais ne permet pas de classer la poussière. Des essais complémentaires en appareillage fermé sont nécessaires.

■ Concentration limite en oxygène

La concentration limite en oxygène est déterminée dans les appareillages et par les procédés utilisés pour l'explosivité. En partant de la concentration stœchiométrique de poussières dans l'air, on

Base de données CARATEX

abaisse la concentration d'oxygène par paliers de 1 % en volume, en ajoutant un gaz inerte jusqu'à ce que le mélange ne puisse plus être enflammé. Lors de cet essai, il convient de tenir compte du fait que la concentration stœchiométrique de poussières baisse lorsque la concentration d'oxygène diminue.

Les valeurs indiquées pour la concentration limite en oxygène reposent sur l'emploi d'azote comme gaz inerte. Lorsque d'autres gaz inertes sont employés, on obtient généralement des concentrations limites en oxygène plus élevées [3].

■ **Energie minimale d'inflammation**

L'énergie minimale d'inflammation d'un mélange air/poussière inflammable est la plus faible énergie stockée dans un condensateur qui, lors de la décharge, est juste suffisante pour obtenir l'inflammation du mélange air/poussières le plus inflammable obtenu à partir d'une poussière explosive donnée, en conditions normales de température et de pression.

L'énergie minimale d'inflammation peut être déterminée tant dans le tube de Hartmann modifié que dans la sphère de 20 l ou le récipient de 1 m³ [15, 19].

Les résultats sont présentés, en règle générale, sous la forme d'un couple de valeurs. La valeur la plus faible est l'énergie pour laquelle on n'observe plus de réaction selon la méthode décrite. La valeur la plus élevée correspond à l'énergie la plus faible encore suffisante pour obtenir l'inflammation.

Il est possible de s'écarter de la méthode standard et de déterminer l'énergie minimale d'inflammation sans inductance dans le circuit de décharge ou, pour des énergies très élevées, en utilisant des détonateurs chimiques.

■ **Température minimale d'inflammation d'un nuage de poussières (température d'auto-inflammation)**

Pour déterminer la température d'inflammation selon Godbert-Greenwald [figure 5], on introduit une petite quantité de poussières (de 0,1 à 3,5 g), dans un volume et sous une pression d'air variables ($V = 50 - 300 \text{ cm}^3$, $p = 1,1 - 1,6 \text{ bar}$), dans la partie supérieure d'un tube électrique chauffé, de 36 mm de diamètre et 400 mm de longueur, disposé verticalement.

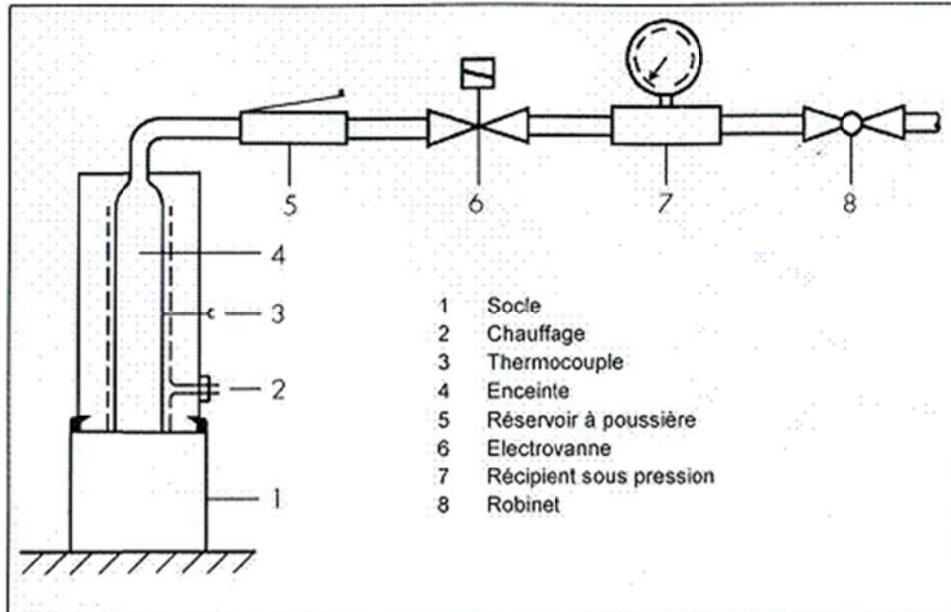


Figure 5 : Schéma de l'appareillage Godbert-Greenwald

Dans la méthode du **four BAM** (*Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung*, Office fédéral d'étude et d'essai des matériaux), la poussière est soufflée vers une surface d'impact verticale qui constitue l'emplacement le plus chaud à l'intérieur du four (disposé horizontalement). Là encore, on fait varier la concentration du mélange air-poussières en introduisant des quantités variables de poussières. On détermine la température la plus basse à laquelle se produit l'inflammation.

Il s'agit, lors de ces essais, de déterminer l'inflammabilité d'un nuage de poussières lors d'un contact de courte durée avec une surface chaude dans un volume clos à température contrôlée. La température d'inflammation est la température la plus basse pour laquelle le mélange air/poussières testé dans l'appareillage brûle avec une flamme.

Le four BAM étant disposé horizontalement, des poussières peuvent se déposer et il peut se former des produits de combustion entraînant éventuellement des valeurs plus basses que dans l'appareillage Godbert-Greenwald [3, 13, 18, 20].

■ Température minimale d'inflammation d'une couche de poussières de 5 mm d'épaisseur (température d'inflammation en couche)

La température d'inflammation en couche est déterminée sur une plaque chauffante électrique de 185 mm de diamètre, dont la température est réglée au moyen d'un thermostat avec une précision de ± 2 °C. Une couche de poussières de 5 mm d'épaisseur et de 100 mm de diamètre est disposée au centre de la plaque préalablement chauffée, et l'on observe le comportement du produit, en s'aidant

Base de données CARATEX

dans certains cas d'un thermoélément possédant une bonne sensibilité. Un début d'inflammation en couche peut éventuellement être activé par un soufflage prudent. La température d'inflammation en couche est la température la plus faible de la plaque sur laquelle, dans un délai de deux heures après l'application du produit, certaines parties de l'échantillon sont enflammées [3, 6, 13, 18].

■ Combustibilité

Le test de combustibilité des poussières vise à déterminer si et dans quelle mesure un incendie déclenché par une source d'inflammation extérieure peut se propager dans un dépôt de poussières. Au moyen d'un fil de platine incandescent porté à une température de l'ordre de 1000 °C, on tente d'enflammer à l'une de ses extrémités un échantillon de poussières disposé en une bande de 2 cm de large et 4 cm de long environ. Le fil n'est plongé que brièvement dans l'échantillon, afin d'éviter un échauffement excessif de ce dernier. Une plaque en céramique de 5 à 20 mm d'épaisseur est utilisée comme support.

Pour les produits qui fondent sous l'effet de la chaleur, on réalise en outre un test sur un échantillon additionné de 20 % (en poids) de kieselguhr, ce qui a généralement pour effet d'accroître la combustibilité. Les produits sont classés en six classes de combustibilité (BZ 1 à BZ 6, BZ = *Brennzahl*, indice de combustibilité).

Comportement de l'échantillon	Classes BZ
pas de combustion	BZ 1
brève combustion suivie d'extinction	BZ 2
combustion ou inflammation en couche localisée, sans propagation	BZ 3
inflammation en couche avec propagation	BZ 4
propagation d'une flamme	BZ 5
combustion de type détonation	BZ 6

Tableau 2 : Classes de combustibilité

■ Influence de divers paramètres sur l'explosivité

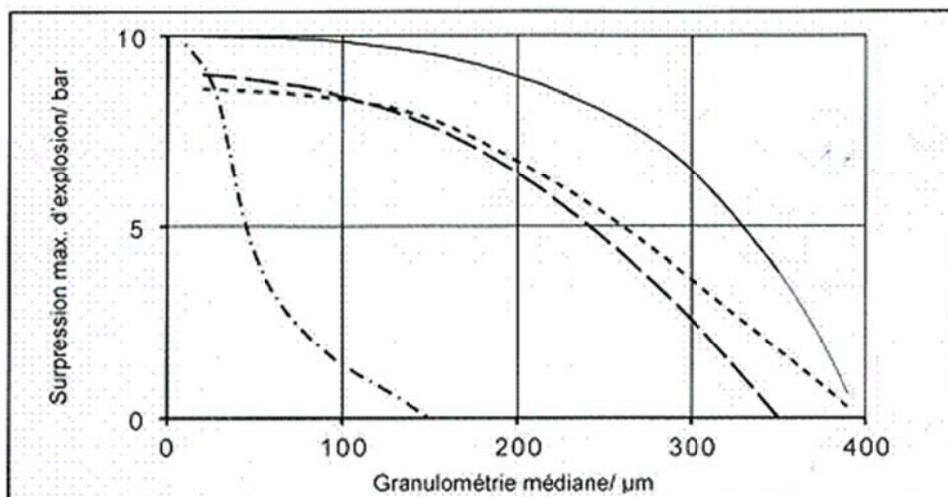
Comme indiqué, divers paramètres peuvent influencer sur l'explosivité des poussières. Il s'agit principalement de la finesse et de la teneur en eau du produit, de la présence de vapeurs de solvants ou de gaz de combustion et de la teneur du mélange explosif en oxygène.

■ Finesse

L'explosivité des poussières dépend dans une large mesure de leur finesse. Les informations sur les caractéristiques d'explosivité des poussières devraient donc toujours être accompagnées de précisions sur la granulométrie correspondante, ou du moins sur sa valeur médiane, qui en fournit une première approximation.

La figure 6 représente, pour différentes poussières, la relation entre la pression maximale d'explosion et la vitesse maximale de montée en pression d'une part et la granulométrie médiane d'autre part. Comme on peut le voir, l'explosivité est d'autant plus forte que la granulométrie est faible. Les poussières fines sont plus facilement inflammables et réagissent plus violemment que les poussières de forte granulométrie.

En augmentant la fraction de forte granulométrie dans l'échantillon de poussière, par exemple en ajoutant à des poussières fines explosibles un granulat en lui-même non explosible, on atténue seulement le déroulement de l'explosion ; les valeurs p_{max} et KSt sont abaissées ; au contraire, l'énergie minimale d'inflammation et la concentration limite en oxygène sont augmentées. Tant que la fraction de poussières fines dans le mélange reste supérieure à la limite inférieure d'explosivité, une explosion de poussière peut se produire. Il faut en outre tenir compte du fait qu'en pratique, à partir d'un matériau de forte granulométrie, les phénomènes d'abrasion les plus divers peuvent donner lieu à la formation de poussières fines.



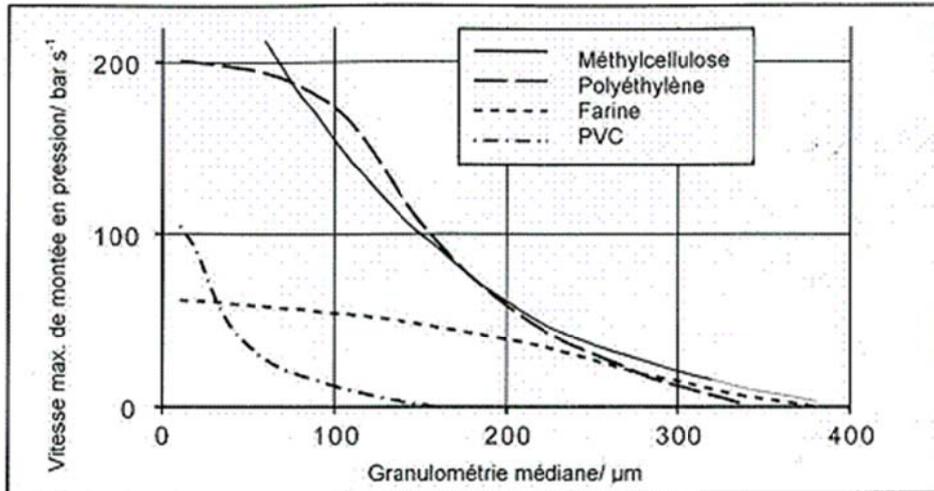
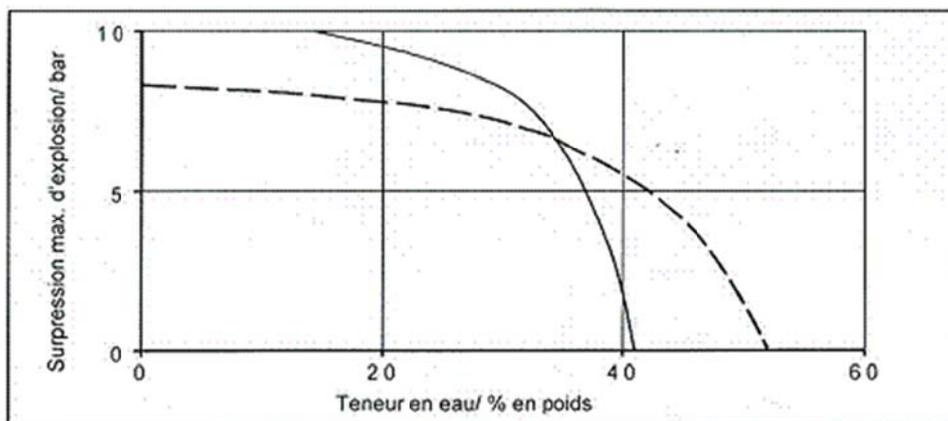


Figure 6 : Incidence de la granulométrie médiane sur l'explosivité ($V = 1 \text{ m}^3$, $EZ = 10\,000 \text{ J}$)

■ Teneur en eau

En règle générale, l'inflammabilité et la réactivité des poussières diminuent avec la teneur en eau. Ce facteur ne joue pratiquement aucun rôle jusqu'à une teneur en eau de 10 % en poids environ. Seule la propension des poussières à former un nuage peut être diminuée. Ce n'est qu'au-delà de 20 % à 30 % d'eau en poids que p_{\max} et K_{St} sont notablement réduites (figure 7).



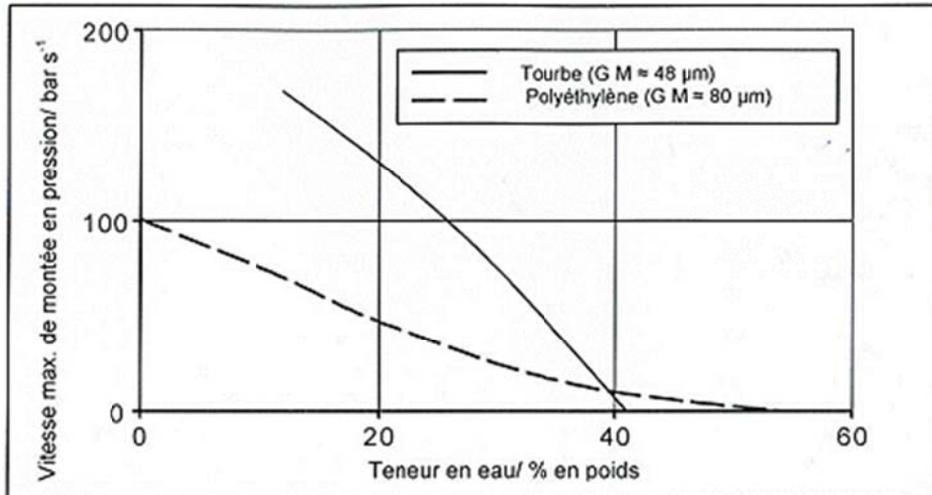


Figure 7 : Incidence de la teneur en eau sur l'explosivité ($V = 1 \text{ m}^3$, $EZ = 10\,000 \text{ J}$)
GM = granulométrie médiane

■ Gaz et vapeurs inflammables

L'explosivité des poussières peut être accrue en présence de gaz inflammables, gaz de combustion, vapeurs de solvants. On désigne ces combinaisons de produits combustibles par le terme de **mélanges hybrides**.

Dans le cas des mélanges hybrides, c'est notamment la vitesse maximale de montée en pression qui est plus élevée (figure 8) et l'énergie minimale d'inflammation est plus basse que lorsque le mélange ne contient que de l'air et de la poussière. Les mélanges hybrides peuvent être explosifs même lorsque la concentration de gaz, de vapeurs ou de poussière est inférieure à la limite inférieure d'explosivité de chacun d'eux pris isolément.

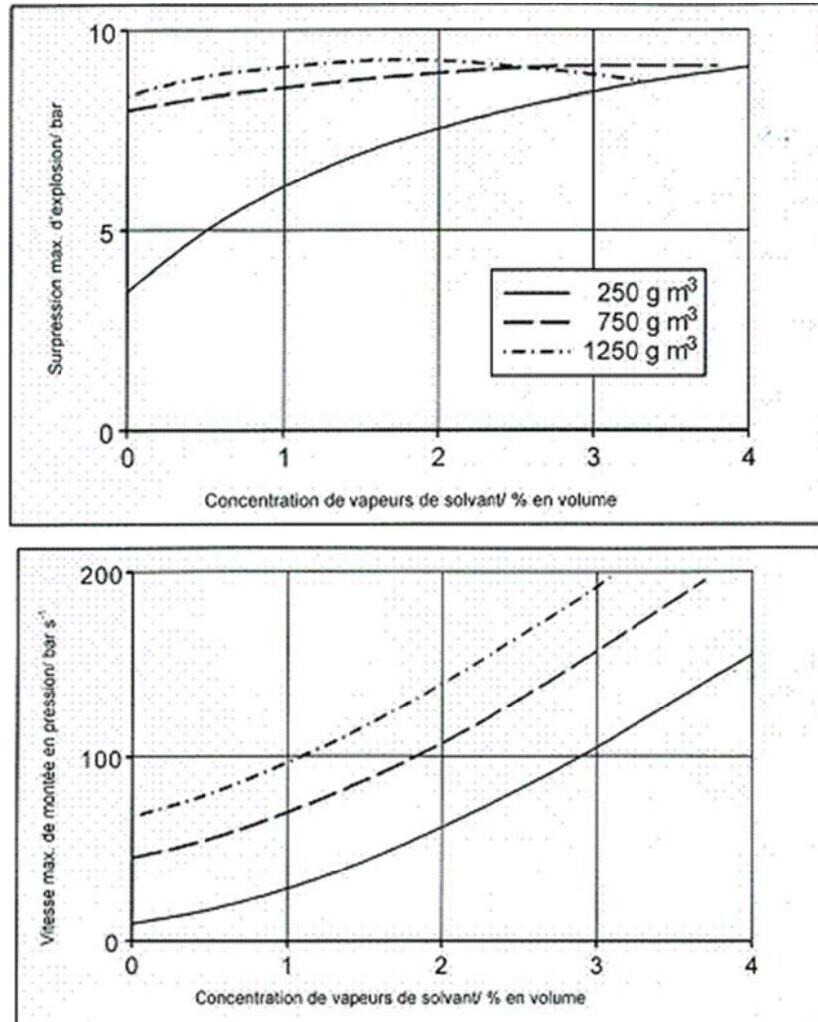


Figure 8 : Incidence de la concentration de vapeurs de solvants sur l'explosivité d'une substance pharmaceutique selon la concentration de poussière ($V = 1 \text{ m}^3$, $EZ = 10\,000 \text{ J}$)

■ Concentration d'oxygène

La réduction de la teneur en oxygène de l'atmosphère où se déroule la combustion, par adjonction de gaz inerte, par exemple, se traduit par une diminution de la violence de l'explosion. Lorsque cette teneur est inférieure à la concentration limite d'oxygène, il n'est finalement plus possible de déclencher une explosion [21 à 25].

■ Adjonction de matières solides non combustibles

L'adjonction de matières solides non combustibles (inertes) à un mélange air/poussière limite également la violence de l'explosion et constitue aussi une sorte d'inertage. On trouvera au tableau 3 quelques exemples montrant les pourcentages de matières inertes dans le mélange pour lesquels il

Base de données CARATEX

n'est plus possible, dans les conditions d'essai habituelles, de déclencher une explosion.

Matière combustible	Médiane en μm	Matière inerte	Médiane en μm	Pourcentage du poids total (% pondéral)
Méthylcellulose	70	Sulfate de calcium (CaSO_4)	< 15	70
Pigment organique	< 10	Monophosphate d'ammonium ($\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$)	29	65
Houille grasse	20	Carbonate de calcium (CaCO_3)	14	65
Houille grasse	20	Carbonate de sodium hydrogéné (NaHCO_3)	35	65
Sucre	30	Carbonate de sodium hydrogéné (NaHCO_3)	35	50

Tableau 3 : Inertage de poussières combustibles par l'adjonction de matières solides inertes ($V = 1 \text{ m}^3$, $EZ = 10\,000 \text{ J}$)

■ Limites d'applicabilité

L'applicabilité des caractéristiques de combustibilité et d'explosibilité réunies dans cette base de données a ses limites en raison, d'une part, de différences considérables dans les propriétés des poussières (composition, granulométrie, structure superficielle, humidité, par exemple) et, d'autre part, de la variabilité des valeurs obtenues selon les méthodes de détermination. Il faut donc garder à l'esprit qu'il s'agit ici uniquement de données indicatives pour l'étude des mesures de prévention.

L'objectif est principalement d'indiquer quelles sont les substances sur lesquelles on dispose de données, si les substances sont explosives et quel peut être l'ordre de grandeur de leurs caractéristiques de combustibilité et d'explosibilité. A cet égard, les poussières inflammables posent souvent un problème car on peut trouver des valeurs très différentes pour des poussières apparemment identiques, d'où la nécessité de réaliser de nouvelles mesures chaque fois que l'on n'a pas la certitude que les poussières sur lesquelles on dispose de données sont très proches, par leurs principaux paramètres (composition, granulométrie et humidité), de la poussière étudiée.

Cela est d'autant plus vrai que, étant donné le volume de données, il est impossible d'écarter tout risque d'erreur, malgré le soin apporté à la compilation des données.



Base de données CARATEX

Dans certains cas, cependant, il peut être judicieux de consulter un grand nombre de données relatives à une même substance, à condition de retenir systématiquement les valeurs les plus sévères pour l'évaluation.

Les caractéristiques présentées ici sont comparables à la fois entre elles et avec d'autres caractéristiques déterminées par les mêmes méthodes. Elles ne sont pas comparables, en revanche, avec les valeurs déterminées selon d'autres méthodes.

On prendra en considération le fait que lorsque la granulométrie et l'humidité diminuent, cela peut donner des valeurs plus élevées pour la pression maximale d'explosion et la vitesse maximale de montée en pression, ainsi que pour la valeur K_{St} , et des valeurs plus basses pour la limite inférieure d'explosivité, la température d'inflammation et l'énergie minimale d'inflammation ; le risque d'explosion est donc plus élevé.

Les caractéristiques sont applicables dans les conditions suivantes :

- Pression : entre 0,9 bar et 1,1 bar
- Oxygène : env. 21 % en volume
- Température : entre 0°C et 30°C

Si, dans la pratique, les conditions s'écartent de ces conditions dites « atmosphériques », d'autres réflexions sont à mener, et il peut être nécessaire de déterminer les caractéristiques dans les conditions propres à l'entreprise. En cas de pression élevée, de teneur élevée en oxygène et de température élevée, il faut s'attendre à une élévation de la combustibilité et de l'explosivité des poussières.

Les valeurs de la base de données ne peuvent pas être utilisées pour l'évaluation des mélanges hybrides (présence simultanée de poussières inflammables et de gaz, brouillards ou vapeurs inflammables, voir [ci-dessus](#)).

Références bibliographiques

- (1) Forschungsbericht Staubexplosionen, Brenn- und Explosions-Kenngrößen von Stäuben (*Rapport d'étude Explosions de poussières. Caractéristiques de combustibilité et d'explosivité des poussières. En allemand*). Schriftenreihe des Hauptverbandes der gewerblichen Berufsgenossenschaften, Bonn, 1980.

- (2) Brenn- und Explosions-Kenngrößen von Stäuben. Sicherheitstechnische Informations- und Arbeitsblätter 140 260 – 140 279 (*Caractéristiques de combustibilité et d'explosivité des poussières. En allemand*). In: BIA-Handbuch Sicherheit und Gesundheitsschutz am Arbeitsplatz. Editeur: Berufsgenossenschaftliches Institut für Arbeitssicherheit – BIA, Sankt Augustin. Erich Schmidt, Bielefeld 1985 – Losebl.-Ausg.
- (3) VDI 2263: Staubbrände und Staubexplosionen, Gefahren – Beurteilung – Schutzmaßnahmen (05.92) (*Incendies et explosions de poussières, Risques – Evaluation – Mesures de prévention. En allemand*). VDI 2263 Blatt 1: Untersuchungsmethoden zur Ermittlung von sicherheitstechnischen Kenngrößen von Stäuben (05.92) (*Méthodes de détermination des caractéristiques de combustibilité et d'explosivité des poussières. En allemand*). Beuth, Berlin 1992.
- (4) VDI 3673 Blatt 1: Druckentlastung von Staubexplosionen (07.95) (*Décharge de la pression d'explosion. En allemand*). Beuth, Berlin 1995.
- (5) Norme ISO 6184/1: Systèmes de protection contre les explosions. Partie 1 : détermination des indices d'explosion des poussières combustibles dans l'air. Novembre 1985.
- (6) Norme CEI 1241-2-1 : Matériels électriques destinés à être utilisés en présence de poussières combustibles – Méthodes de détermination de la température minimale d'inflammation de la poussière. Décembre 1994.
- (7) Norme NF EN 1127-1 : Atmosphères explosives Prévention de l'explosion et protection contre l'explosion Partie 1 : Notions fondamentales et méthodologie. Février 2008.
- (8) Regeln für Sicherheit und Gesundheitsschutz bei der Arbeit – Explosionsschutz-Regeln – (EX-RL) (06.98) (*Règles relatives à la sécurité et à la santé au travail – Règles de protection contre les explosions. En allemand*). Berufsgenossenschaft der chemischen Industrie, Heidelberg 1998.
- (9) Directive 94/9/CE du 23 mars 1994 concernant le rapprochement des législations des États membres pour les appareils et les systèmes de protection destinés à être utilisés en atmosphères explosibles (Journal officiel n° L 100 du 19/04/1994 p. 0001 - 0029).
- (10) Directive 1999/92/CE du Parlement européen et du Conseil, du 16 décembre 1999, concernant les prescriptions minimales visant à améliorer la protection en matière de sécurité et de santé des travailleurs susceptibles d'être exposés au risque d'atmosphères explosives (quinzième directive particulière au sens de l'article 16, paragraphe 1, de la directive 89/391/CEE). Journal officiel n° L 023 du 28/01/2000 p. 0057 – 0064.
- (11) Sichere Handhabung brennbarer Stäube (*Prévention des risques liés aux poussières*

combustibles. En allemand). VDI-Berichte 304. VDI, Düsseldorf 1978.

■(12) Ritter, K ; Berthold, W. : Bedeutung sicherheitstechnischer Kenndaten gegen Gas-, Staub- und Wärme-Explosionen (*Importance des caractéristiques d'inflammabilité et d'explosivité pour la prévention des explosions de gaz et de poussières et des explosions thermiques. En allemand*). Chem.-Ing. Techn. (1979) Nr. 51, S. 174-183.

■(13) Norme NF EN 60079-14 : Atmosphères explosives - Partie 14 : conception, sélection et construction des installations électriques. Décembre 2008, et norme NF EN 50281-1-2 Matériels électriques destinés à être utilisés en présence de poussières combustibles - Partie 1-2 : matériels électriques protégés par enveloppes - Sélection, installation et entretien. Février 2003.

■(14) Palmer K. N. : Dust explosions and fires (*Explosions et incendies de poussières. En anglais*). Chapman and Hall, London, 1973.

■(15) Norme NF EN 13821 : Prévention et protection contre l'explosion. Détermination de l'énergie minimale d'inflammation des mélanges poussière/air. Février 2003.

■(16) Siweck, R. : 20-l-Laborapparat für die Bestimmung der Explosionskennzahlen brennbarer Stäube (*Appareillage de laboratoire pour la détermination des caractéristiques d'explosivité des poussières en sphère de 20 l. En allemand*). HTL Winterthur, Diplomarbeit 1977.

■(17) Lütolf, J. : Kurzmethoden zur Prüfung brennbarer Stäube (*Poussières combustibles : méthodes d'essai rapides. En allemand*). VDI-Berichte Nr. 304. VDI, Düsseldorf 1978, S. 39-46.

■(18) Leuschke, G.; Osswald, R. : Bedeutung und Ermittlung von sicherheitstechnischen Kenngrößen brennbarer Stäube (*Importance et détermination des caractéristiques d'inflammabilité et d'explosivité des poussières combustibles. En allemand*). VDI-Berichte Nr. 304. VDI, Düsseldorf 1978, S. 29-38.

■(19) Berthold, W. (Hrsg.): Bestimmung der Mindestzündenergie von Staub/Luft-Gemischen (*Détermination de l'énergie minimale d'inflammation des mélanges poussière/air. En allemand*). Fortschrittberichte VDI Reihe 3, Nr. 134. VDI, Düsseldorf, 1987.

■(20) Dorsett, H.G.; Jacobsen, M.; Nagy, J.; Williams, R.P.: Laboratory equipment and test procedures for evaluating explosibility of dusts (*Équipement de laboratoire et procédures d'essai pour l'évaluation de l'explosivité des poussières. En anglais*). Bureau of mines report of investigation 5624. 1960.

■(21) Leuschke, G.: Über die Klassifizierung brennbarer Stäube (*La classification des poussières combustibles. En allemand*). Staub-Reinhalt. Luft 39 (1979) Nr. 9, S. 326-332.



Base de données CARATEX

- (22) Wiemann, W.: Einfluss der Temperatur auf Explosionskenngrößen und Sauerstoffgrenzkonzentration (*Incidence de la température sur les caractéristiques d'explosivité et la concentration limite en oxygène. En allemand*). VDI-Berichte Nr. 494. VDI, Düsseldorf 1984, S. 89-98.
- (23) Hanel, H.: Über die Brand- und Explosionsgefahren in der Braunkohlenindustrie – Erkenntnisse und Probleme (*Risques d'incendie et d'explosion dans l'industrie du lignite. En allemand*). Freiburger Forschungshefte A 382, 1966.
- (24) Bartknecht, W.: Explosionen – Ablauf und Schutzmaßnahmen (*Explosions – Déroulement et mesures de prévention. En allemand*). Springer, Berlin 1980.
- (25) VDI 2263-2: Staubbrände und Staubexplosionen, Gefahren – Beurteilung – Schutzmaßnahmen. Blatt 2: Inertisierung (*Incendie et explosions de poussières, risques – évaluation – mesures de prévention. Feuillet 2 : Inertage. En allemand*). (05.92). Beuth, Berlin 1992.

Autres sources d'information

- INRS, Les mélanges explosifs. 2 Poussières combustibles. Edition INRS ED 944, 2006, 62 p., ill., bibliogr.
- INRS, Caractéristiques d'explosivité de poussières industrielles. Détermination expérimentale sur six échantillons représentatifs. Note documentaire ND 2070-170-98. Cahiers de notes documentaires, n° 170, 1er trimestre 1998, pp. 5-19, ill., bibliogr.
- NF EN 14034-1 Février 2005. Détermination des caractéristiques d'explosion des nuages de poussières – Partie 1 : détermination de la pression maximale d'explosion p_{\max} des nuages de poussière.
- NF EN 14034-2 Juillet 2006. Détermination des caractéristiques d'explosion des nuages de poussières – Partie 2 : détermination de la vitesse maximale de montée en pression de l'explosion $(dp/dt)_{\max}$ des nuages de poussières.
- NF EN 14034-3 Juillet 2006. Détermination des caractéristiques d'explosion des nuages de poussières – Partie 3 : détermination de la limite inférieure d'explosivité LIE des nuages de poussières.
- NF EN 14034-4 Juin 2005. Détermination des caractéristiques d'explosion des nuages de poussières – Partie 4 : détermination de la concentration limite en oxygène CLO des nuages de poussière.



Base de données CARATEX

- PR NF EN 14034-1/A1 Mars 2009. Détermination des caractéristiques d'explosion des nuages de poussières – Partie 1 : détermination de la pression maximale p_{\max} de l'explosion des nuages de poussière.
- PR NF EN 14034-2/A1 Mars 2009. Détermination des caractéristiques d'explosion des nuages de poussière – Partie 2 : détermination de la vitesse maximale de montée en pression de l'explosion $(dp/dt)_{\max}$ des nuages de poussière.
- PR NF EN 14034-3/A1 Mars 2009. Détermination des caractéristiques d'explosion des nuages de poussière – Partie 3 : détermination de la limite inférieure d'explosivité LIE des nuages de poussière.
- PR NF EN 14034-4/A1 Mars 2009. Détermination des caractéristiques d'explosion des nuages de poussière – Partie 4 : détermination de la concentration limite en oxygène CLO des nuages de poussière.
- NF EN 50281-2-1 Août 2000. Matériels électriques destinés à être utilisés en présence de poussières combustibles – Partie 2-1 : méthodes d'essai – Méthodes de détermination de la température minimale d'inflammation de la poussière.