

IMPACT DE LA REPRÉSENTATIVITÉ DES ÉCHANTILLONS SUR L'ÉVALUATION DES RISQUES INCENDIE ET EXPLOSION DE POUSSIÈRES

La réactivité des poudres ou des poussières vis-à-vis de l'oxygène de l'air, souvent négligée ou mal connue, constitue pourtant un déterminant essentiel du risque d'incendie et d'explosion. Ce risque est d'autant plus insidieux que les propriétés des solides divisés peuvent évoluer tout au long de leur cycle de vie industrielle : usure mécanique, humidification, vieillissement chimique, contamination croisée ou encore recyclage modifient sensiblement leur comportement face aux sources d'inflammation, favorisant éventuellement le risque d'incendie mais aussi la capacité des produits pulvérulents à former une atmosphère explosive (Atex).

AGNÈS JANÈS
Université
de Lorraine/
Service
départemental
d'incendie et de
secours de l'Oise
(SDIS-60)

ALEXIS VIGNES
Institut
national de
l'environnement
industriel et des
risques (Ineris)

**OLIVIER
DUFAUD**
Université
de Lorraine

L'évaluation fiable des risques incendie et explosion des produits pulvérulents ne peut se fonder uniquement sur des données génériques issues de la bibliographie. Elle exige une compréhension fine de l'évolution des produits au cours du temps et de la représentativité des échantillons à considérer pour l'analyse des risques. Cet article propose une lecture des enjeux liés à la caractérisation des produits pulvérulents, en s'appuyant sur des situations industrielles concrètes et sur l'expérience de terrain. Dans le monde industriel, les produits sous forme divisée – poussières, poudres, granulés, pellets, comprimés – sont omniprésents. Les caractéristiques physicochimiques de leur fraction pulvérulente gouvernent leur facilité à se mettre et à rester en suspension dans l'air, ainsi que leur réactivité avec l'oxygène de l'air. L'aptitude à former une Atex, la sensibilité aux sources d'inflammation et la violence d'explosion en milieu confiné sont des données d'entrée indispensables pour évaluer le risque d'explosion. Les caractéristiques physicochimiques des poudres ou poussières peuvent se modifier peu à peu à l'intérieur des installations industrielles, de façon beaucoup plus marquée que dans le cas des gaz et vapeurs. En effet, il existe une forte variabilité de la pulvéulence, de l'inflammabilité et de l'explosivité des

produits divisés au fil du temps et tout au long d'un procédé : leur granulométrie, leur forme, leur composition, leur teneur en eau ou en gaz adsorbé sont autant de paramètres qui imposent l'utilisation avec précaution des bases de données ou des tests effectués sur un échantillon. Les évolutions techniques, les choix industriels en termes de produits et de procédés sont également des facteurs renforçant la variabilité de la réactivité des produits. Au travers d'exemples issus de retours d'expérience publiés dans la base de données Aria [1], cet article souligne l'importance de la représentativité des échantillons de poudres choisis pour la détermination des paramètres de sécurité. En effet, ce choix conditionne la fiabilité de l'analyse du risque d'explosion d'Atex, que celle-ci s'appuie sur une base de données reconnue ou sur une caractérisation expérimentale.

Où trouver des données et avec quelles limites d'utilisation ?

L'évaluation du risque de formation et d'inflammation d'Atex associé à un produit pulvérulent s'appuie sur ses caractéristiques d'inflammabilité et d'explosivité (Cf. Tableau 1).

Des explications détaillées, concernant la signification et l'interprétation de ces données, sont disponibles dans le guide d'utilisation de la base

PARAMÈTRE	DÉFINITION	EXEMPLES D'UTILISATION POUR LA PRÉVENTION DES RISQUES D'INCENDIE ET D'EXPLOSION
Aptitude à former une Atex		
Pulvéulence	Potentiel d'un matériau à générer des poussières en suspension dans l'air lors de sa manipulation.	Évaluation du risque de formation d'Atex du fait de la facilité de mise en suspension des poussières et du temps nécessaire pour la re-déposition des poussières sur les surfaces horizontales.
Limite inférieure d'explosivité (LIE)	Concentration minimale du domaine d'explosivité à laquelle une explosion peut survenir. Notes : • les concentrations indiquées sont celles pour lesquelles une explosion ne se propage plus pendant les essais ; • la dénomination « concentration minimale explosive (CME) » est parfois employée. Elle correspond à la même définition, mais n'est pas normalisée en Europe.	Prévention de la formation d'Atex par : • la maîtrise de la concentration en poussières dans les réseaux de ventilation ; • le contrôle des dépôts de poussières sur les surfaces horizontales, le nettoyage des installations. Classement en zones à risque de formation d'Atex.
Concentration limite en oxygène (CLO)	Concentration maximale en oxygène d'un mélange d'une substance inflammable, d'air et d'un gaz inerte dans lequel une explosion ne se produit pas, déterminée dans des conditions d'essais spécifiées. Note : La CLO dépend du combustible et du gaz inerte utilisé.	Prévention de la formation d'Atex par inertage (par exemple, avec de l'azote, du dioxyde de carbone, ou encore de l'argon).
Sensibilité aux sources d'inflammation		
Température minimale d'inflammation (TMI) en nuage	Température la plus faible d'une surface chaude à laquelle le mélange air/poussières le plus inflammable s'enflamme dans des conditions d'essai spécifiées.	Prévention de l'inflammation d'Atex par limitation des températures de surface des équipements (calcul d'une température maximale de surface des matériels).
Température minimale d'inflammation (TMI) en couche	Température la plus faible d'une surface chaude à laquelle une inflammation se produit dans une couche de poussière dans des conditions d'essai spécifiées.	
Énergie minimale d'inflammation (EMI)	Énergie électrique la plus faible stockée dans un condensateur qui, sous l'effet de sa décharge, est juste suffisante pour provoquer l'inflammation du mélange poussières/air le plus inflammable dans des conditions d'essai spécifiées.	Évaluation des risques d'inflammation d'Atex par des sources d'inflammation d'origine électrostatique. Prévention de l'inflammation d'Atex par la sélection du matériel adapté.
Violence d'explosion en milieu confiné		
Pression maximale d'explosion (p_{max})	Valeur maximale de la pression d'explosion mesurée au cours des essais de pression d'explosion en faisant varier la teneur en substances inflammables du mélange.	Protection contre les effets des explosions par : • conception d'équipements résistants à la pression ; • dimensionnement des dispositifs de protection (par exemple : événements, suppresseurs, dispositifs d'isolement).
Vitesse maximale de montée en pression [$(dp/dt)_{max}$]	Valeur maximale de l'augmentation de la pression par unité de temps, obtenue lors de l'explosion en récipient fermé.	
Coefficient de violence d'explosion (K_{st})	Valeur maximale de l'augmentation de la pression par unité de temps normalisée par le volume. Caractéristique intrinsèque de la poussière.	
Aptitude à propager la combustion		
Classe de combustibilité	Classement de l'aptitude de la poussière à propager la combustion.	Prévention du risque d'incendie par le dimensionnement d'un stockage. Protection contre le risque d'incendie par la définition de la stratégie d'extinction.

↑ TABLEAU 1 Caractéristiques de pulvéulence, d'inflammabilité et d'explosivité des produits pulvérulents.



Caratex [2] (INRS-Gestis) et sur le site Internet de l'Ineris [3].

Dans le cas des substances et des mélanges pour lesquels une fiche de données de sécurité (FDS) est établie, et même si le risque d'explosion de poussières est signalé, les données relatives à l'inflammabilité et à l'explosivité des matières pulvérulentes ne sont qu'exceptionnellement précisées. En effet, celles-ci ne constituent pas des données concourant à la classification des dangers, au sens du règlement CLP [4], car le danger est lié à la mise en œuvre du produit et non à ses caractéristiques intrinsèques.

De plus, les produits tels que la farine de blé, la sciure de bois ou encore les poudres alimentaires ne sont pas soumis à l'obligation de transmission d'une FDS, bien qu'ils soient susceptibles de former une Atex lors de leur mise en suspension dans l'air.

Enfin, l'expérience montre que les FDS ne sont pas toujours actualisées, et comportent parfois des confusions de termes ou des erreurs. En particulier, les limites décrites ci-dessous sont régulièrement rencontrées :

- Absence d'indication ou erreur concernant la forme du produit : certaines FDS de produits en poudre ne comportent pas d'indication de leur répartition granulométrique, ou, lorsque la granulométrie est mentionnée, il s'agit d'une indication peu précise, comme un diamètre maximum ou moyen. Par ailleurs, dans certains cas, la FDS fait mention d'un

état « liquide » alors qu'il s'agit d'une poudre utilisée dans une suspension.

- Utilisation d'un terme général pouvant recouvrir plusieurs variétés allotropiques. Par exemple, le terme « carbone » peut correspondre à du noir de carbone, de la poudre de diamant, des nanotubes, des fullerènes, du graphite...
- Confusions terminologiques : il existe parfois une confusion entre « explosible » ou « pyrophorique » et « risque de formation d'Atex par mise en suspension dans l'air ». Les dangers liés au caractère explosible ou pyrophorique constituent des classes de danger spécifiques du règlement CLP, qui définit des essais permettant de conduire à la classification dans l'une des catégories associées. Ces essais n'ont aucun point commun avec les caractéristiques d'inflammabilité ou d'explosivité des poussières pour le risque d'explosion d'Atex.
- Une autre confusion est particulièrement fréquente, entre « non inflammable » au sens réglementaire (substance n'appartenant pas à la classe de danger des solides inflammables) et « non combustible », c'est-à-dire suffisamment peu oxydable pour pouvoir conclure à l'absence de risque de formation d'Atex lors d'une mise en suspension dans l'air. De nombreuses poudres qui ne remplissent pas la condition de classification du CLP en « solide inflammable » sont néanmoins susceptibles de former une Atex. C'est le cas par exemple de la

Atelier de menuiserie bois avec une ventilation générale et aspiration localisée sur les équipements de travail.



© Grégoire Maisonneuve pour l'INRS / 2025

← **TABLEAU 2**
Bases de données de caractéristiques d'inflammabilité et d'explosivité d'utilisation fréquente.

BASE DE DONNÉES OU RÉFÉRENCE	COMMENTAIRES
ED 944 (INRS) [5]	Données d'inflammabilité et d'explosivité de plusieurs dizaines de poussières, d'après notamment des résultats expérimentaux obtenus par le <i>US Bureau of Mines</i> .
Caratex/Gestis-dust-Ex (INRS - IFA) [2]	Caratex fournit la traduction en français par l'INRS de la base de données expérimentales de la <i>Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV)</i> concernant l'inflammabilité et l'explosivité de poussières, comportant près de 7 000 entrées.
BIA-Report 13/97 [6]	Il s'agit de la publication des données d'inflammabilité et d'explosivité obtenus par le DGUV, pour environ 4 300 échantillons de poussières, provenant de pratiquement tous les secteurs industriels.
Norme NFPA 660 [7]	L'annexe Y rassemble des données expérimentales d'inflammabilité et d'explosivité de poussières.

poudre de charbon actif ou de certaines matières plastiques.

Compte tenu de l'ensemble de ces limitations, la consultation complémentaire de différentes bases de données (Cf. *Tableau 2*) permet d'enrichir les données d'entrée pour l'évaluation des risques de formation et d'inflammation d'Atex.

Ces bases de données doivent cependant être utilisées avec prudence, en raison de l'existence des limitations suivantes.

Influence du protocole expérimental

La première limitation concerne l'hétérogénéité des protocoles expérimentaux de caractérisation. En effet, les caractéristiques d'inflammabilité et d'explosivité ne sont pas intrinsèques au produit testé, et dépendent des conditions expérimentales comme le montrent les exemples ci-dessous. De plus, différents protocoles coexistent parfois pour la détermination d'une même caractéristique. Certaines données sont, par ailleurs, issues d'essais anciens ou obtenues avec des protocoles ou des équipements expérimentaux non normalisés. Par conséquent, il est indispensable de vérifier la date, les normes et les conditions d'essai qui ont conduit aux résultats proposés dans une référence bibliographique.

- L'épaisseur, le tassement et la porosité de la couche de produit soumis à un essai de température minimale d'inflammation en couche (TMI) sont déterminants par rapport au résultat obtenu. Une couche plus épaisse favorise l'auto-échauffement et la température d'inflammation est donc plus faible. De plus, les conditions expérimentales (température ambiante, isolation thermique présentée par le support) ont également une grande influence.
- Pour les essais d'inflammation en nuage, l'utilisation du four normalisé « BAM » conduit à une température minimale d'inflammation (selon la norme NF EN ISO/IEC 80079-20-2 [8]) plus faible que celle du four normalisé « Godbert-Greenwald ».
- Pour l'énergie minimale d'inflammation (EMI), l'utilisation d'un inflammateur Mike 3 (selon la norme

NF EN ISO/IEC 80079-20-2 [8]) avec ou sans inductance entraîne une durée d'étincelle différente et influence le résultat. Par ailleurs, les résultats obtenus sur les mêmes échantillons avec le tube de Hartmann, utilisé dans le passé dans la même norme mais de conception différente, peuvent différer de ceux obtenus avec l'inflammateur Mike 3.

- Les caractéristiques de violence d'explosion en milieu confiné, p_{max} et K_{st} , sont également très dépendantes de l'aptitude du produit testé à se mettre en suspension dans l'air et de l'intensité de la turbulence dans l'équipement d'essais.

Pertinence de l'échantillon pour lequel les données sont disponibles par rapport au produit à caractériser

La seconde limitation est liée à la représentativité de l'échantillon dont les caractéristiques sont détaillées dans les bases de données, par rapport à la poudre ou la poussière réellement stockée ou mise en œuvre dans le procédé considéré.

Il existe une très forte dépendance de l'inflammabilité et de l'explosivité des poudres ou poussières à leur granulométrie et à leur humidité, et dans une moindre mesure à leur morphologie. Plus les poussières sont fines et sèches, plus la sensibilité à l'inflammation et la violence d'explosion augmentent. Il est donc primordial de s'assurer que les données utilisées pour l'évaluation des risques correspondent bien au produit manipulé.

De plus, la présence d'impuretés ou encore le mélange de plusieurs produits peuvent influencer considérablement l'inflammabilité et l'explosivité. Ceci s'applique dans tous les cas, que le constituant additionnel soit combustible ou inerte, sous forme de poudre ou de poussière, de liquide ou encore de gaz ou de vapeur adsorbés. Ces situations se rencontrent particulièrement dans les filières émergentes avec les produits recyclés, les matériaux biosourcés, les poudres pour fabrication additive, etc. Enfin, dans le cas des matériaux pulvérulents, contrairement à celui des gaz et des vapeurs,



plusieurs produits identifiés par le même nom peuvent être très différents. À titre d'exemples, la recherche « aluminium » dans la base Caratex (INRS-Gestis) [2] renvoie 750 résultats, celle de « bois » conduit à plus de 200 résultats et celle de « blé » plus de 80.

En définitive, les FDS permettent d'orienter l'évaluation initiale de la dangerosité des poussières combustibles. En complément, les bases de données existantes peuvent fournir les caractéristiques d'inflammabilité et d'explosivité indispensables pour conduire l'évaluation des risques d'explosion d'Atex. Mais, dans certains cas, cela ne suffit pas et il est nécessaire de recourir à un avis d'expert et/ou à une détermination expérimentale de l'inflammabilité et de l'explosivité de la poussière ou de la poudre concernée.

Exemples d'accidents liés à la méconnaissance de l'inflammabilité et de l'explosivité des produits

Modification du produit du fait du fonctionnement des installations

Le fonctionnement normal des installations peut conduire à une modification du produit, durant les opérations de granulation, d'atomisation, de broyage, ou encore de tamisage. C'est le cas également dans les équipements de manutention ou les installations de ventilation. En effet, le produit évolue tout au long du procédé : abrasion par le frottement entre les particules, frottement sur les surfaces internes des équipements, sédimentation différente en fonction de la granulométrie, séparation par un dispositif de filtration (cyclone, média filtrant), etc. Ces modifications de granulométrie impactent significativement le risque d'explosion. Ainsi, en fonction de la granulométrie considérée, le risque est différent ; il faut donc évaluer le risque spécifiquement pour chaque équipement, en fonction du produit réellement présent.

Le produit peut aussi être modifié en cas de dysfonctionnement du procédé. Il est donc nécessaire de prendre en compte les dérives ou les pannes prévisibles dans l'évaluation des risques. C'est le cas par exemple de l'accident de Bucy-le-Long en 2023 (référéncé n° 61407 dans la base Aria du Barpi¹) : une explosion suivie d'un départ de feu se produit dans un sécheur exploité par une sucrerie. À la suite d'un bourrage au niveau d'un cyclone, la ligne de production est arrêtée mais le sécheur est laissé en fonctionnement, ce qui rend les poussières de pulpe de betterave plus sèches qu'en fonctionnement normal. Lors du redémarrage quelques heures plus tard, ces poussières explosent. Cet accident a fait deux blessés parmi les salariés. À la suite de l'enquête, il a été recommandé à l'entreprise d'améliorer ses procédures de démarrage et d'arrêt de l'installation et la formation des salariés, ainsi que de disposer

d'un système d'injection d'eau et d'un moyen de surveillance de la température entre le sécheur et les cyclones, de même que d'un dispositif de surveillance de l'humidité du produit en sortie de sécheur.

Modification des conditions de fonctionnement du procédé

La modification des paramètres de fonctionnement d'un procédé peut également avoir un impact sur le risque de formation et d'inflammation d'Atex. C'est notamment le cas lorsque les vitesses dans le réseau de ventilation sont modifiées. Une réduction du débit de ventilation réduit la vitesse de transport des poussières et favorise les dépôts à l'intérieur des canalisations. Le cas de l'accident de Parentis-en-Borne en 2019 (référéncé n°54360 dans la base Aria du Barpi) en est un exemple : un incendie est détecté dans un cyclone de dépoussiérage d'un four de pré-séchage de bois, dans une usine produisant des charbons actifs. Peu après le début de l'injection d'eau par le système d'extinction, une déflagration se produit et deux salariés sont brûlés. Les conditions du procédé avaient été modifiées quatre mois plus tôt, avec l'utilisation d'un bois plus sec et une vitesse d'extraction des gaz réduite. Aucune analyse des risques induits par cette modification de process n'avait été réalisée. Une couche de poussières épaisse de 40 cm a été observée dans la conduite d'extraction des gaz. L'incendie initial a pu être provoqué par de l'électricité statique ou l'introduction de particules incandescentes. L'arrêt du ventilateur d'extraction des gaz et l'injection d'eau ont pu mettre en suspension les poussières dans la conduite et provoquer l'explosion.

Modification des conditions atmosphériques

Bien qu'elles ne soient en général pas maîtrisables par le préventeur, les conditions atmosphériques peuvent avoir un impact sur les caractéristiques d'inflammabilité ou d'explosivité des poussières, ou encore sur les mécanismes de leur inflammation. En fonction des variations de température et/ou de pression, la quantité de gaz adsorbé à la surface des poudres peut varier. Qu'il s'agisse d'oxygène ou de vapeurs combustibles, ces fluctuations peuvent influencer sur l'explosivité des poudres. Ainsi, des charbons actifs contenant des composés organiques volatils, des tourteaux céréaliers incluant des traces d'hexane ayant servi à l'extraction des huiles, ou encore des sciures ayant servi à la récupération de solvants, comme dans le cas de l'explosion de filtre survenu à Amnéville en 2001 (référéncé n°21264 dans la base Aria du Barpi), sont autant d'exemples pratiques de poudres pour lesquelles les phases de sorption/désorption, provoquées par les changements de conditions atmosphériques, affectent l'inflammabilité. Dans le contexte de l'évolution climatique actuelle,

l'augmentation de la température ambiante est un facteur favorisant notamment l'auto-échauffement des poudres².

Plus largement, la saisonnalité entraîne parfois des modifications de conditions opératoires ou de pratiques qui tendent à faire évoluer le risque lié aux explosions de poussières. La ventilation naturelle d'un atelier en été ou la convection forcée générée par les systèmes de chauffage en hiver en sont des illustrations.

Enfin, les conditions atmosphériques affectent également les modalités d'inflammation et notamment les phénomènes qui conduisent à la génération de décharges électrostatiques : une forte humidité relative favorise l'écoulement des charges, alors qu'un temps sec est propice à l'accumulation des charges. Le cas de l'accident qui s'est produit à Sant-Pierre-La-Garenne en 2017 (référéncé n°49108 dans la base Aria du Barpi) en est un exemple : une explosion s'est produite sur un filtre à poussières du réseau de ventilation d'une unité de fabrication de fongicide soufré d'une usine de produits phytosanitaires. En raison des conditions météorologiques très défavorables, l'installation avait été arrêtée. L'hypothèse la plus probable concernant la source d'inflammation est la présence d'un phénomène d'origine électrostatique. La température relativement élevée du fongicide pendant la phase d'arrêt de l'unité (jusqu'à 104°C, contre 70°C lors de la phase de production) aurait pu rendre le produit plus sensible à une telle décharge. De plus, la faible humidité de l'air pendant la phase d'arrêt a pu conduire à une génération accrue d'électricité statique.

À l'inverse, une humidité trop importante peut elle aussi engendrer des risques d'incendie et d'explosion d'Atex liés à un bourrage des équipements et à la génération de sources d'inflammation telles que des surfaces chaudes ou des étincelles d'origine mécanique.

Vieillessement ou oxydation du produit

Tout au long de leur procédé de fabrication ou durant leur stockage, les poudres peuvent aussi subir des modifications physicochimiques progressives sous l'effet du vieillissement, modifiant leurs caractéristiques d'inflammabilité et d'explosivité.

L'une des illustrations les plus directes de ce phénomène se rencontre pour les matériaux pulvérulents biologiquement actifs dont la stabilité temporelle n'est parfois que relative. Par exemple, le comportement thermique de tas de compost ou de boues d'épuration dépend de l'action des micro-organismes qui les constituent. Par leur action continue, ces agents biologiques modifient la composition, la structure et donc la réactivité des poussières organiques qu'ils prennent pour substrat. D'autres poudres combustibles et biologiquement actives



© Gaël Kerbaol / INRS / 2023

peuvent voir leur réactivité évoluer au cours du temps : des levures utilisées dans les industries agroalimentaires, des poudres enzymatiques employées dans l'industrie papetière (cellulase, xylanase, mannanase...) ou des probiotiques produits par l'industrie pharmaceutique (*Lactobacillus...*).

Un autre phénomène lié à une décroissance temporelle d'activité peut survenir aussi avec des poudres chimiquement actives. C'est le cas des biochars, charbons issus de la pyrolyse de la biomasse et possédant de fortes concentrations de radicaux libres. Ces radicaux peuvent persister plus de six mois après la génération des biochars mais leur teneur diminue graduellement et les radicaux carbonés se déplacent progressivement vers les composés oxygénés, ce qui peut modifier leur sensibilité vis-à-vis du risque d'inflammation.

Ces phénomènes peuvent être couplés à des processus d'adsorption/désorption d'air et d'oxydation partielle de la surface des grains de poudre. Ainsi, la variation de l'explosivité du graphite en fonction



ENCADRÉ 1

QUESTIONS UTILES POUR L'ÉVALUATION DES RISQUES DE FORMATION ET D'INFLAMMATION D'ATEX

Identification des produits :

1. Quelles sont les propriétés physicochimiques, physiques, chimiques des produits stockés, mis en œuvre ou émis ?
2. Le procédé modifie-t-il (les caractéristiques de) la poudre/poussière (broyage, séchage, granulation, compactage, vieillissement, adsorption de gaz ou vapeur...) ?
3. La poudre/poussière peut-elle se mélanger (adsorber ?) à des vapeurs ou à un gaz ? Dans l'affirmative, quelle est la composition du mélange ?

Évaluation du risque de formation d'Atex/classement des zones à risque de formation d'Atex :

4. Où et quand un nuage de poudre/poussières peut-il se former ?
5. Où et quand des couches de poudre/poussières peuvent-elles s'accumuler ? Quelle est l'épaisseur typique de ces couches ?

Évaluation du risque d'inflammation d'Atex :

6. Quelles sources d'inflammation peuvent être présentes à l'intérieur ou au voisinage des zones à risque de formation d'Atex (flammes nues, particules incandescentes, étincelles d'origine électrostatique, étincelles électriques, étincelles mécaniques, surfaces chaudes/points chauds...) ?
7. Quelle est leur énergie/température, par rapport à la sensibilité du produit aux sources d'inflammation ?

Évaluation des mesures de protection contre le risque d'explosion :

8. Quels volumes ou équipements faut-il protéger contre les effets des explosions ? Par quel principe effectuer cette protection (résistance aux effets de la pression d'explosion, évent d'explosion, suppression d'explosion, découplage) ?

de sa durée de stockage a été démontrée. Bien que les pressions d'explosion et vitesses maximales de montée en pression soient dans l'absolu faibles pour ce produit, les résultats montrent une décroissance significative de ces paramètres 30 semaines après le broyage des poudres. Ils se stabilisent ensuite pour des durées de stockage plus importantes.

Les poudres métalliques sont également réputées être extrêmement sensibles à l'oxydation de surface. Dans leur cas, il apparaît légitime de considérer que leur réactivité va décroître en fonction de leur durée d'exposition à l'air. Cependant, il faut garder à l'esprit deux aspects essentiels. D'une part, ces réactions d'oxydation sont exothermiques et la chaleur générée peut être à l'origine de phénomènes d'échauffement locaux, certes rares au vu de la conductivité thermique des métaux. D'autre part, le mélange d'oxydes métalliques et de métaux non oxydés, notamment l'aluminium, rend possible des réactions d'aluminothermie, réaction

exothermique également utilisée de façon contrôlée pour la soudure de rails de chemin de fer. Une explosion impliquant des poudres d'aluminium et d'oxydes de fer est d'ailleurs à l'origine de la destruction du site industriel d'Hayes Lemmerz (USA) en 2003, tuant un salarié et en brûlant deux autres sévèrement [10]. D'un point de vue pratique, ce type de mélange réactif pourrait être rencontré lors d'opérations de ponçage de surfaces métalliques, tôles ou carrosseries. D'autres types de réactions exothermiques métal/oxydes ou des réactions intermétalliques peuvent également impliquer des poudres métalliques [11].

Enfin, le vieillissement peut également impacter la nature des matériaux suite à la réticulation de composés lignocellulosiques (passage d'une forme linéaire à une forme tridimensionnelle) ou à des phénomènes de recristallisation. Des mesures d'énergies minimales d'inflammation (EMI) effectuées sur des poudres de bois et de marcs de raisin, avant et après vieillissement accéléré, montrent à la fois un effet significatif et une variabilité importante des résultats. L'EMI des échantillons de bois tend à croître après vieillissement, alors que les marcs de raisin sont au contraire plus réactifs, leur EMI descendant à 740 mJ alors qu'elle était supérieure à 1000 mJ à l'origine. La structure chimique des poudres peut également évoluer par fracturation de chaînes de polymères. Cette dernière réaction est bien connue pour les matières plastiques qui se dégradent sous l'action des rayonnements ultraviolets, ce qui produit des radicaux libres et réduit la résistance mécanique des composés, les rendant plus aptes à produire de fines particules, potentiellement plus sensibles aux sources d'inflammation.

Variabilité des caractéristiques de la matière première

L'évolution des procédés dans le temps ou la variabilité, voulue ou subie, des gisements de matière première modifient aussi le produit mis en œuvre. Dans le domaine du traitement des déchets, la composition chimique, la granulométrie et la morphologie des poudres traitées ou générées sont sujettes à des fluctuations importantes.

Le cas des poudres d'origine biologique est par ailleurs remarquable. En fonction de leur provenance géographique ou de leur degré de maturation/croissance, les végétaux peuvent, par exemple, avoir des teneurs différentes en lignine ou en sucre. De manière plus secondaire, de telles fluctuations peuvent se rencontrer pour diverses farines animales, qu'il s'agisse de viande, de sang, de plumes, de poisson ou d'insectes. Ces produits sont tous combustibles et peuvent former une Atex lorsque leurs poussières suffisamment fines sont mises en suspension dans l'air.

Dans le contexte du développement d'une économie

circulaire, la valorisation toujours plus poussée des polymères synthétiques ou plastiques doit également attirer l'attention des préventeurs. Ainsi, du fait d'un recours étendu aux additifs tels que les pigments ou les lubrifiants pour améliorer les propriétés des polymères, et de l'accroissement des tonnages en matériaux composites, comme des composites fibres de bois/biomasse-plastiques CBP, le recyclage des plastiques génère des poudres de plus en plus fines et de composition complexe.

La même problématique se rencontre lors du recyclage de matériaux métalliques. L'utilisation fréquente d'alliages complexes et de composites métalliques dans l'industrie automobile, aéronautique ou lors de production à plus petite échelle par fabrication additive rend ce gisement sujet à des variations de composition. Ce même type de mélanges solide/solide se retrouve par exemple lors des opérations de ponçage de carrosserie, durant lesquelles des poudres métalliques ou des poudres de matériaux plastiques de taille et de densité différentes sont générées et mélangées. Une remise en suspension des poussières peut alors conduire à leur ségrégation en fonction de leurs propriétés physiques. Par exemple, la partie supérieure d'un nuage de poussières d'aluminium et de fer de granulométries équivalentes verra sa concentration en fer décroître au cours du temps (différence de masse volumique), ce qui impacte le risque d'explosion car la poussière d'aluminium est plus sensible aux sources d'inflammation et explose plus violemment que la poussière de fer.

De plus, les exigences croissantes sur les taux de valorisation des déchets impliquent des tris plus affinés et des broyages plus fins, permettant une meilleure récupération des ressources secondaires. Ces exigences sont à considérer avec attention dans la mesure où les risques d'explosion sont susceptibles d'être accrus. Par ailleurs, des modifications du cahier des charges ou des exigences des clients peuvent être à l'origine de changements de la granulométrie. C'est le cas par exemple pour l'accident de Linxe en 1994 (référéncé n°5072 dans la base Aria du Barpi) : deux explosions se sont produites dans un cyclone et un filtre à manches d'une ligne de broyage/séchage de copeaux verts. Des conditions de broyage diminuant la granulométrie pourraient être à l'origine de ces accidents. Au cours de l'intervention, un salarié et un pompier ont été blessés.

Des précautions doivent être également prises lors de la conversion d'une chaudière initialement conçue pour brûler du charbon en une chaudière utilisant de la biomasse. L'inflammabilité des poussières de bois brut ou torréfié n'est pas significativement différente de celle des poussières de charbon. Cependant, les pellets, en particulier de bois torréfié, sont beaucoup plus friables et génèrent une quantité bien plus importante de poussières fines.

ENCADRÉ 2

QUE FAIRE POUR PALLIER LES LIMITES DES DONNÉES ISSUES DES RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES ?

1. Recouper les informations : croiser les sources de données et vérifier les dates des essais et leurs conditions expérimentales,
2. Vérifier la représentativité des échantillons testés par rapport aux produits mis en œuvre dans les installations, notamment leur granulométrie et leur taux d'humidité, ainsi que l'état du produit : brut – après réception/fabrication, après manipulation dans des équipements de manutention, durée de stockage...
3. Prendre en compte la variabilité de l'échantillon en collectant des données sur des produits similaires mais de granulométrie, forme et humidité différentes, dans la limite des conditions du procédé concerné.

Ces poussières fines satureront les installations de ventilation et s'accumulent dans les équipements de manutention mal ventilés, ce qui peut être à l'origine d'un risque de formation et d'inflammation d'Atex. En outre, la composition des pellets peut varier, notamment lorsqu'ils comprennent des additifs (amidon, mélasse, huile...) visant à augmenter leur pouvoir calorifique ou à faciliter leur mise en forme.

Bonnes pratiques pour une évaluation efficace de l'inflammabilité et de l'explosivité des produits

Les questions utiles pour l'évaluation des risques de formation et d'inflammation d'Atex associés à l'utilisation de poudres ou de poussières combustibles sont rassemblées dans l'*Encadré 1*.

Pour les substances et les préparations sous forme de poudres ou de poussières, c'est leur pulvéulence et leur réactivité avec l'oxygène de l'air qui gouvernent le risque de formation et d'inflammation d'Atex, au travers notamment de leurs caractéristiques d'inflammabilité et d'explosivité. Il s'agit donc d'un état, et non d'une constante.

Les informations issues des FDS et des bases de données usuelles, dont les références sont rassemblées dans le *Tableau 2*, sont particulièrement utiles pour orienter cette évaluation. Cependant, elles ne peuvent permettre de faire l'économie d'une stratégie d'échantillonnage représentative et adaptée au procédé pour garantir l'adéquation entre les données issues de la bibliographie et les produits réellement présents. Les bonnes pratiques pour contourner les limites des bases de données disponibles sont proposées dans l'*Encadré 2*. En cas de doute, il est possible de solliciter un avis d'expert pour vérifier la pertinence et l'adéquation des données disponibles. Il peut être nécessaire en



complément de recourir à une détermination expérimentale respectant des conditions contrôlées et un protocole normalisé. Dans ce cas, il convient de respecter certaines bonnes pratiques. Celles-ci sont résumées dans le *Focus* p. 37.

Dans tous les cas, les résultats de la recherche bibliographique ou de la caractérisation expérimentale de l'inflammabilité et de l'explosivité doivent se traduire en actions de prévention du risque d'explosion d'Atex. Ceci concerne en particulier : le dimensionnement des installations de captage à la source, le classement des zones à risque de formation d'Atex, le dimensionnement d'un dispositif d'inertage, la définition de la température maximale de surface des matériels utilisables en Atex, le dimensionnement des dispositifs de protection contre les effets des explosions.

Conclusion

Le risque d'explosion d'Atex lié aux poussières ne peut être correctement évalué sans un regard critique sur la représentativité et la pertinence des données utilisées.

Ce regard implique de ne pas considérer les données techniques comme figées, mais bien comme des résultats conditionnés par un contexte précis : origine du produit, conditions opératoires, environnement ambiant et historique du produit. Une valeur relative à une caractéristique d'inflammabilité ou d'explosivité ne saurait donc être transposée sans discernement d'un contexte à un autre.

Face aux produits composites, recyclés, émergents (dont les caractéristiques intrinsèques sont encore

méconnues) ou instables, la prévention passe par la réévaluation régulière du risque de formation et d'inflammation d'Atex, et donc des caractéristiques d'inflammabilité et d'explosivité des produits stockés ou utilisés, le recours raisonné à la caractérisation expérimentale, et la montée en compétence des acteurs de terrain. Cette montée en compétence repose sur la diffusion de connaissances actualisées, mais aussi sur l'analyse critique des retours d'expérience et l'appropriation des phénomènes physiques sous-jacents.

Les pratiques de terrain montrent que les situations d'incertitude sont fréquentes : produits changeants, filières en évolution, collecte difficile de données fiables. Dans ce contexte, le rôle du préventeur est non seulement de rechercher la donnée, mais aussi de poser les bonnes questions, d'identifier les écarts possibles et d'anticiper les effets non linéaires liés à des mélanges ou à des évolutions physiques non maîtrisées.

Enfin, l'intégration de la prise en compte des caractéristiques physicochimiques des produits à la conception du procédé (par l'application des principes de sécurité intrinsèque) peut, lorsque c'est possible, favoriser la réduction du risque. ●

1. Bureau d'analyse des risques et pollutions industrielles ; l'un des bureaux de la Direction générale de la prévention des risques (DGPR).

2. Les caractéristiques physicochimiques et les méthodes permettant de caractériser la sensibilité des produits au phénomène d'auto-échauffement sont décrites dans une précédente note technique, parue dans cette même revue [9].

BIBLIOGRAPHIE

[1] MINISTÈRE EN CHARGE DE L'ÉCOLOGIE ET DU DÉVELOPPEMENT DURABLE – Base de données Aria. Accessible sur : <https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/>

[2] INRS – Base de données Caratex. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/dam/jcr:2da04194-4a03-4db9-80b8-7553dc0fa4d7/guide-utilisation-caratex-poussieres.pdf> ; <https://www.inrs.fr/publications/bdd/caratex.html> ; <https://staubex.ifa.dguv.de/?lang=f>

[3] INERIS – Inflammabilité, explosivité des poudres, poussières, liquides et gaz. Accessible sur : <https://prestations.ineris.fr/fr/solutions-thematiques/substances-melanges-produits/caracterisation-dangers/inflammabilite>

[4] INRS – Mémento du règlement CLP. ED 6207. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%206207>

[5] INRS – Les mélanges explosifs. Poussières combustibles. ED 944. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%20944>

[6] BECKE H. ET AL. – Combustion and explosion characteristics of dusts. BIA Report, 1997. Accessible sur : <https://www.dguv.de/medien/ifa/en/pub/rep/pdf/rep02/biar1397/report-13-97.pdf>

[7] NORME NFPA 660 – Standard for combustible dusts and particulate solids. 2025. Accessible sur : <https://www.nfpa.org/codes-and-standards/nfpa-660-standard-development/660>

[8] NORME NF EN ISO/IEC 80079-20-2 – Atmosphères explosives – Partie 20-2 : caractéristiques des produits. Méthodes d'essai des poussières combustibles. Afnor, 2016. Accessible sur : <https://www.boutique.afnor.org/> (site payant).

[9] JANÈS A., VIGNES A. – Incendie, explosion : attention au phénomène d'auto-échauffement des solides divisés. *Hygiène & sécurité du travail*, 2018, 250, NT 60, pp. 64-70. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=NT%2060>

[10] US CSB – Investigation report: aluminum dust explosion. Hayes Lemmerz International, Report Nr. 2004-01-I-IN, Chemical safety.

[11] FISCHER S., GRUBELICH M. – A survey of combustible metals thermites and intermetallics for pyrotechnic applications. AIAA, 1996, 15. Accessible sur : DOI :10.2514/6.1996-3018

[12] INRS – Mise en œuvre de la réglementation relative aux atmosphères explosives (Atex). Guide méthodologique. ED 945. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%20945>

FOCUS SUR... Les bonnes pratiques pour la détermination expérimentale des caractéristiques d'inflammabilité et d'explosivité

1. Fournir au laboratoire chargé de l'analyse l'ensemble des informations contextuelles :

- Décrire le procédé ;
- Indiquer le cas échéant les zones de formation d'Atex identifiées, les zones d'accumulation de poudre/poussières et l'épaisseur associée ;
- Préciser les opérations modifiant la poudre : compactage, broyage, séchage, utilisation de solvants... ;
- Donner la description la plus complète possible de l'échantillon (granulométrie, humidité, origine, prétraitements) en fonction des données disponibles.

2. Prélever un ou plusieurs échantillons représentatifs du contexte de stockage ou de mise en œuvre et vérifier avec le laboratoire chargé de l'analyse la pertinence de l'échantillonnage.

En particulier, il est nécessaire d'évaluer les caractéristiques d'inflammabilité et d'explosivité de la poudre/poussière en différents endroits, notamment en cas de broyage, atomisation, séchage, granulation, recyclage, passage au travers des systèmes de filtration.

3. Cibler les objectifs des essais, en fonction des réponses aux questions de l'Encadré 1.

4. Définir le programme expérimental avec le laboratoire chargé de l'analyse, en corrélation avec les objectifs des essais :

- Caractérisation de la distribution granulométrique et du taux d'humidité, et préparation de l'échantillon (tamisage et séchage)¹ conformément aux protocoles normalisés ;
- Évaluation de l'aptitude à former une Atex : en cas de doute, détermination de la LIE. En l'absence de doute, passer à l'évaluation de la sensibilité aux sources d'inflammation, ou directement à l'évaluation de la violence d'explosion en milieu confiné en fonction des besoins ;
- Évaluation de la sensibilité aux sources d'inflammation, en fonction des besoins mis en évidence par l'évaluation préliminaire des risques (Cf. Question 6 de l'encadré 1), par ordre de priorité : détermination de l'EMI (avec ou sans inductance²), de la TMI en couche (épaisseur la plus courante : 5 mm), de la TMI en nuage³ ;
- Évaluation de la violence d'explosion en milieu confiné : en cas de besoin de dimensionner des équipements de protection contre les effets des explosions, détermination de p_{max} et du K_{St} ⁴ ;
- Détermination de la CLO : en cas de besoin de dimensionner un dispositif de prévention de la formation d'Atex par inertage.

La section 6 de la norme NF EN ISO/IEC 80079-20-2 [8] propose des logigrammes utiles pour la définition du protocole expérimental.

5. Réaliser des essais normalisés uniquement, sauf conditions particulières de stockage ou de procédé, telles qu'un fonctionnement à une pression différente de la pression atmosphérique, à une température très élevée, en atmosphère enrichie ou appauvrie en oxygène...

6. Vérifier la compétence du laboratoire et la représentativité du protocole expérimental. Ceci est particulièrement important dans le cas du stockage ou de la mise en œuvre dans le procédé :

- D'un mélange hybride de poudre ou poussières avec un gaz ou une vapeur : il est nécessaire d'effectuer des essais paramétriques avec différentes compositions du mélange, et il est nécessaire de solliciter un laboratoire d'analyse qui dispose d'un savoir-faire et d'installations expérimentales spécifiques ;
- De poudre/poussières de métaux réactifs : l'énergie d'activation de la réaction d'oxydation par l'oxygène de l'air est très faible et sa température est très élevée, ce qui peut être à l'origine d'accidents au cours des essais. ●

1. Les normes de détermination des caractéristiques d'inflammabilité et d'explosivité prévoient en général une étape de préparation de l'échantillon avant les essais. Il s'agit de sécher le produit, le plus souvent à 60 °C pendant 24 heures, et de le tamiser pour ne soumettre à l'essai que la fraction susceptible de contribuer à l'explosion. Ceci est un avantage pour le classement relatif de l'inflammabilité et de l'explosivité de plusieurs produits comparés entre eux, par exemple. Cette pratique permet également une approche conservatrice, en considérant l'inflammabilité et l'explosivité des produits dans des conditions de ségrégation granulométrique défavorables (accumulation de la fraction la plus fine à certains points du procédé, comme la trémie d'un dépoussiéreur, les surfaces horizontales en hauteur d'un atelier...) et météorologiques (été particulièrement chaud et sec...). En revanche, certaines entreprises préfèrent tester le produit tel qu'il est prélevé dans l'installation. Si c'est l'approche retenue, il convient de vérifier qu'en aucun cas une fraction granulométrique plus fine ou du produit plus sec ne peuvent être présents dans l'installation. Quoi qu'il en soit, il est indispensable de caractériser la granulométrie et le taux d'humidité du produit soumis aux essais, afin de relier les résultats obtenus à ces informations. Ceci permet par la suite, en cas de modification du procédé ou du gisement de matières premières, de valider la représentativité des résultats d'inflammabilité et d'explosivité.

2. L'EMI sans inductance est plutôt représentative des étincelles électriques, comme celles qui se produisent lors de contacts électriques ou de décharges d'origine électrostatique. L'énergie est libérée sur un temps court. L'EMI avec inductance est plutôt représentative des étincelles d'origine mécanique, telles que les frottements, chocs ou ruptures de contacts mécaniques. L'ajout d'une inductance dans le circuit électrique augmente la durée de l'étincelle et favorise le transfert d'énergie aux poussières en suspension dans l'air. Ceci tend à diminuer la valeur de l'EMI obtenue au cours de l'essai, toutes choses égales par ailleurs. En général, l'EMI est déterminée avec inductance car cette approche est conservatrice.

3. Pour l'évaluation de la température maximale de surface du matériel utilisable en Atex, les deux valeurs de TMI en nuage et de TMI en couche de 5 mm sont utilisées. Dans la plupart des cas, c'est la valeur de TMI en couche qui est dimensionnante. Aussi, si seulement l'une des deux TMI doit être déterminée, il est souvent préférable de choisir la TMI en couche de 5 mm. Le mode de calcul de la température maximale de surface du matériel utilisable en Atex est explicité dans la brochure de l'INRS ED 945 [12] : « pour les poussières, les températures des surfaces doivent être inférieures ou égales à la valeur la plus faible des deux critères suivants : deux tiers de la température minimale d'inflammation du nuage air/poussières ; température minimale d'inflammation d'une couche de 5 mm d'épaisseur de la poussière considérée diminuée de 75 degrés ».

4. Il est nécessaire d'interpréter les résultats de p_{max} et de K_{St} avec prudence, dans la mesure où il existe des effets liés notamment à la géométrie et à l'extrapolation des résultats à des grands volumes. C'est pourquoi il est recommandé de faire valider le rapport d'essai par un expert, avant la transposition des résultats en prescriptions techniques pour le dimensionnement des dispositifs de protection des installations contre les effets des explosions.