

HYGIÈNE & SÉCURITÉ DU TRAVAIL

La revue technique de l'INRS
janvier • février • mars 2026

N° 282

/ Décryptage /

Les eaux non conventionnelles :
risques et prévention

/ Note technique /

Les retardateurs
de flamme :
stratégie de mesures

/ Étude de cas /

Chantiers de
désamiantage :
mesure du débit
d'air extrait

/ Veille & prospective /

Défis écologiques,
numériques et nouveaux
modes de production



Dossier

Incendie, explosion : désamorcer les risques

L'INRS

L'Institut national de recherche et de sécurité (INRS) pour la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles est une association loi 1901, créée sous l'égide de la Caisse nationale de l'assurance maladie (Cnam). L'Institut est géré par un conseil d'administration paritaire composé, à parts égales, d'un collège représentant les employeurs et d'un collège représentant les salariés, présidé alternativement par un représentant d'un de ces collèges. Financé en quasi-totalité par l'Assurance maladie – Risques professionnels, à qui il apporte son concours, l'INRS inscrit son action dans le cadre des orientations de la branche Accidents du travail – maladies professionnelles (AT-MP). Ses domaines de compétences couvrent les risques physiques (bruit, vibrations, champs électromagnétiques, machines...), chimiques, liés aux substances comme aux procédés (solvants, poussières...), biologiques (infectieux, immunoallergiques...), électriques, incendie / explosion, psychosociaux et organisationnels... Sa mission est de contribuer à la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles, et plus précisément:

- d'identifier les risques professionnels;
- d'analyser leurs conséquences sur la santé de l'homme au travail;
- de concevoir, de diffuser et de promouvoir des solutions de prévention auprès de tous les acteurs de la prévention: spécialistes des risques professionnels en entreprise ([Q]HSE, IPRP, cadres et fonctionnels en charge de la sécurité et de la santé au travail, animateurs de sécurité, personnes compétentes...), experts – conseil, dirigeants d'entreprise ou d'établissement et (D)RH, élus aux CSE/CSSCT/RP et représentants syndicaux, salariés, agents du réseau Assurance maladie – Risques professionnels (AM-RP), services de prévention et de santé au travail (interentreprises ou autonomes)...

Les activités de l'INRS s'organisent selon quatre axes (en plus des métiers supports): études et recherche, assistance, formation et information / communication.

> Notre métier, rendre le vôtre plus sûr

The screenshot displays the INRS website interface. At the top, the title 'REVUE HYGIÈNE & SÉCURITÉ DU TRAVAIL' is prominent. Below it, a 'SOMMAIRE' section lists various topics like 'Étude de cas', 'Veille et prospective', and 'Bases de données'. A 'Dans ce numéro' section highlights a 'DOSSIER Éclairage des lieux de travail' with an accompanying image of a construction site. To the right, a 'VOIR AUSSI' section features 'Rayonnements optiques' with a brief description of the risks and prevention measures. The page also includes a search bar and social media icons.

Retrouvez-nous sur le Web:

Ou abonnez-vous en ligne sur:

hst.fr

DIRECTEUR DE LA PUBLICATION

Stéphane Pimbert
Directeur général de l'INRS

ÉQUIPE DE RÉDACTION

Antoine Bondéelle
Rédacteur en chef, INRS
Sandrine Pierrat
Secrétaire de rédaction, INRS
Taina Grastilleur, Maud Foutieau
Corrections
Amélie Lemaire,
Valérie Latchague-Causse
Maquettes et infographies, INRS
Nadia Bouda
Iconographe, INRS
Sandrine Voulyzé
Chargée de fabrication, INRS
Nadège Marmignon
Assistante, INRS

COMITÉ ÉDITORIAL

Antoine Bondéelle, Sandrine Pierrat
Équipe de rédaction, INRS
Benoît Courrier
Direction des Études
et de la recherche, INRS
Patrick Laine
Chef du département Expertise
et conseil technique, INRS
Fahima Lekhchine
Chef du département Information
et communication, INRS
Lionel Limousy
Chef du département Ingénierie
des équipements de travail, INRS
Jean Theurel
Chef du département Sciences
appliquées au travail et aux
organisations, INRS
Jérôme Triolet
Direction des Applications, INRS
Delphine Vaudoux
Responsable du pôle
Publications périodiques, INRS

ONT PARTICIPÉ À CE NUMÉRO :

Guillaume Antoine, Sébastien Bau,
Jean-Christophe Blaise,
Myriam Bouslama, Mélanie Burlet,
Sarah Burzoni, Célia Callois,
Jennifer Clerté, Benoît Courrier,
Jérôme Daubech, Thierry Delbaere,
Virginie Drean, Olivier Dufaud,
Williams Estève, Marjorie Fougère,
Cyril Gehl, Nathalie Grova,
Corinne Grusenmeyer,
Baninia Habchi, Audrey Humbert,
Agnès Janès, Sébastien Jacquinet,
Jennifer Klingler, Juliette Kunz-Iffli,
Luc Laborde, Sullivan Lechêne,
Marie Lecler, Emmanuel Leprette,
Pierre-Nicolas Mauger,
Esther Monnoyer, Laurent Paris,
Bastien Pellegrin, Aurélie Périssé,
Benoît Sallé, Jean-François Sauvé,
Marie-Astrid Soenen,
Joséphine Steck, Jonathan Terroir,
Nicolas Trevisan, Benjamin Truchot,
Maëlis Vayssié, Nicolas Veith,
Alexis Vignes, Anja Vomberg,
Günther Weise, Benno Weinberger,
François Zimmermann,
les relecteurs internes de la revue,
les pôles Information juridique
et Traductions de l'INRS, ainsi que
les photographes cités.

Photo de couverture :
© Vincent Nguyen pour l'INRS / 2019

L'édito de...

MARJORIE FOUGÈRE, directrice des Études et de la recherche, INRS



© Olivier Rémy / INRS / 2026

Chaque jour, en moyenne, une explosion se produit dans le milieu industriel en France. Les effets peuvent être dévastateurs, tant sur le plan humain que matériel. Parmi les secteurs industriels les plus exposés figurent ceux qui utilisent ou génèrent des produits chimiques (raffinerie, chimie fine...) ou des poudres ou poussières (industrie du bois, des métaux, de l'agroalimentaire...). La prévention du risque d'explosion fait l'objet d'une réglementation spécifique, dite « ATEX » (atmosphères explosives) que l'employeur doit appliquer dans son entreprise. Elle s'appuie sur les principes généraux de prévention édictés par le Code du travail. Les incendies, eux, sont plus fréquents et touchent des entreprises de toutes tailles et de tous secteurs.

Si le nombre de victimes directes (blessures ou décès par brûlure ou intoxication par les fumées) reste heureusement relativement faible, les conséquences socio-économiques, tant directes (dégâts matériels, pertes de production...) qu'indirectes (perte de clientèle, périodes de chômage technique, incertitudes sur l'activité...) peuvent être considérables. La destruction par le feu d'un établissement entraîne très souvent sa fermeture définitive : c'est le cas pour deux entreprises sur trois après un incendie majeur. La prévention des risques d'incendie est donc fondamentale et doit intervenir le plus en amont possible, dès la conception et l'implantation des locaux, ou dès la mise en place d'un nouveau procédé de production. L'employeur doit tenir compte des exigences du Code du travail, auxquelles peuvent éventuellement s'ajouter d'autres réglementations, selon la nature des activités exercées et le type de structure (ICPE : installation classée pour la protection de l'environnement, ERP : établissement recevant du public...), mais aussi des bonnes pratiques et règles de l'art. L'avènement de nouveaux procédés concourant à la réduction des émissions de gaz à effets de

« Deux entreprises sur trois cessent définitivement leur activité après un incendie majeur. La prévention des risques d'incendie est donc fondamentale. »

serre génère de nouvelles situations de travail et des risques émergents, qui nécessitent d'adapter la démarche de prévention. Pour se faire accompagner dans cette démarche, les entreprises peuvent faire appel à différents interlocuteurs, parmi lesquels les représentants des Carsat / Cramif / CGSS. Le dossier de ce numéro est consacré à la prévention des risques

d'incendie et d'explosion. L'INRS, pour le compte du réseau Assurance maladie – Risques professionnels, propose une offre d'information dédiée à ces risques, afin d'aider les entreprises à mieux les prévenir. Ces ressources sont notamment détaillées dans le premier article de ce dossier : des supports communs à tous les secteurs d'activité, mais aussi des publications spécifiques, portant sur les générateurs d'aérosols, les industries du bois, de l'aluminium, les installations de méthanisation, les stations-services, les équipements utilisant du gaz (véhicules, bouteilles...), les cabines de peinture, etc. Ce dossier aborde également les risques incendie et explosion liés à des technologies plus récentes, tout particulièrement concernées par ces risques : production d'hydrogène par électrolyse, utilisation et recharge de batteries lithium-ion... Il présente pour finir des démarches et méthodes innovantes de prévention, proposant un large éventail de solutions pour mieux prévenir les incendies et les explosions sur les lieux de travail. L'INRS et le réseau prévention poursuivent un même objectif : donner aux entreprises les moyens de prévenir ces événements aux conséquences potentiellement dévastatrices.

SOMMAIRE

Savoirs & actualités

Décryptage

Utilisation des eaux non conventionnelles : quels risques pour les salariés et quelles mesures de prévention ?
P. 05

Actualité [amiante]

Mesure des fibres d'amiante en santé au travail : rôle et pertinence de la microscopie électronique à transmission analytique (Meta)
P. 14

Actualité juridique

Mise en œuvre des préconisations du médecin du travail dans tous les lieux où le salarié intervient
P. 16

L'employeur est tenu par les préconisations du médecin du travail
P. 19

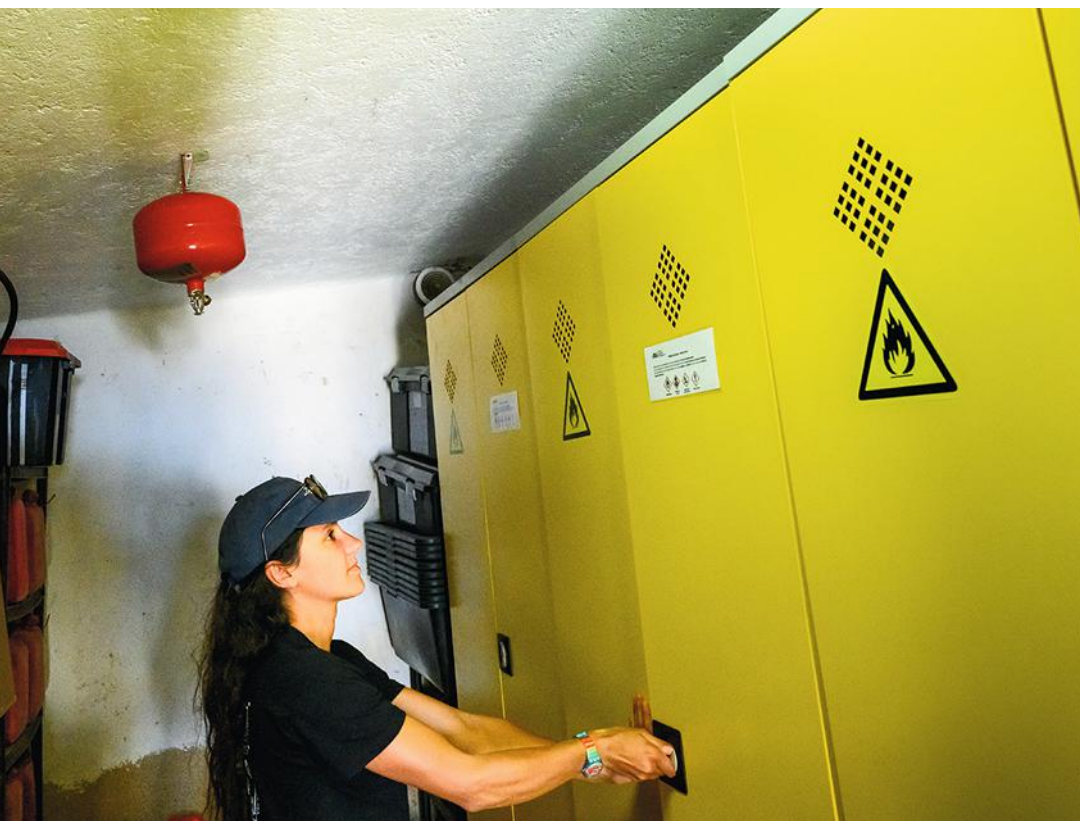
Focus normalisation

Ventilation des cabines d'engins : une norme horizontale plutôt que des solutions individuelles
P. 20

Dossier

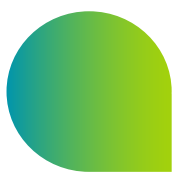
Incendie, explosion : désamorcer les risques
P. 22

- Incendie et explosion : tous concernés
P. 24
- Impact de la représentativité des échantillons sur l'évaluation des risques d'incendie et d'explosion de poussières
P. 28
- Méthodes de production d'hydrogène, risques associés et prévention
P. 38
- Prévention du risque incendie et explosion dans les solutions conteneurisées
P. 42
- Assurer une conception efficace des barrières de sécurité incendie et explosion
P. 48
- L'ingénierie de sécurité incendie : un outil au service de la prévention
P. 56



© Gaël Kerbaal / INRS / 2024

Incendie, explosion : désamorcer les risques (lire le dossier p. 22).



Études & solutions

Notes techniques

- Enjeux et déploiement d'une stratégie de mesures des retardateurs de flamme en milieu professionnel :
filière du traitement des DEEE
P. 63

- Proposition de classification de la pulvérulence des poudres par la méthode de l'agitateur Vortex
P. 72

Étude de cas

- Débit d'air extrait sur les chantiers de désamiantage : comment le mesurer ?
P. 80

Base de données Colchic

- Portrait rétrospectif des expositions professionnelles dans les fonderies de 2015 à 2024
P. 88



© Gaël Kerbaol / INRS / 2022

Portrait rétrospectif des expositions professionnelles dans les fonderies de 2015 à 2024 (lire l'article p. 88).

À ce jour, la base de données Colchic compte plus d'un million de résultats pour 745 agents chimiques et biologiques, et représente un outil d'aide pour l'identification des axes prioritaires de prévention du risque chimique.



Agenda & services

Congrès

Machines : agir en prévention tout au long du cycle de vie
P. 97

Agenda/Événements
P. 102

Formation

Vibrations au travail : se former pour prévenir un risque professionnel aux effets irréversibles
P. 104

Agenda/Formations
P. 108

Sélection bibliographique


À lire, à voir
P. 110



Veille & prospective

Prospective

Défis écologiques, numériques et recomposition des modes de production
P. 113



Savoirs & actualités

Décryptage

Utilisation des eaux non conventionnelles :
quels risques pour les salariés
et quelles mesures de prévention ?

P.05

Actualité [amiante]

Mesure des fibres d'amiante en santé au travail :
rôle et pertinence de la microscopie électronique
à transmission analytique (Meta)

P. 14

Actualité juridique

Mise en œuvre des préconisations du médecin du travail
dans tous les lieux où le salarié intervient

P. 16

L'employeur est tenu
par les préconisations du médecin du travail

P. 19

Focus normalisation

Ventilation des cabines d'engins : une norme horizontale
plutôt que des solutions individuelles

P.20

Dossier

Incendie, explosion : désarmer les risques

P. 22

Décryptage

UTILISATION DES EAUX NON CONVENTIONNELLES : QUELS RISQUES POUR LES SALARIÉS ET QUELLES MESURES DE PRÉVENTION ?

Les eaux non conventionnelles (ENC) peuvent être utilisées pour des usages variés : domestiques, agricoles, arrosage d'espaces verts, propreté urbaine, agroalimentaire, industriels. Ces eaux peuvent présenter des risques sanitaires et professionnels. En s'appuyant sur le cadre réglementaire existant, cet article présente les mesures de prévention à mettre en place pour limiter les risques liés à l'utilisation de ces eaux.

USE OF NON-CONVENTIONAL WATER: WHAT ARE THE RISKS FOR WORKERS AND WHAT PREVENTIVE MEASURES SHOULD BE APPLIED? – Non-conventional water (NCW) may be used in a variety of applications: domestic, agricultural, irrigation of green spaces, street cleaning, food and agriculture, industrial. However, this water can present health and occupational risks. Relying on the existing regulatory framework, this article presents the preventive measures to be implemented to limit the risks associated with the use of NCW.

MYRIAM
BOUSLAMA
INRS,
département
Expertise
et conseil
technique

Face au changement climatique et ses conséquences sur l'appauvrissement des ressources naturelles en eau, la valorisation des eaux non conventionnelles (ENC) fait l'objet d'un intérêt croissant pour préserver la ressource en eau potable. Ces eaux constituent un ensemble hétérogène d'eaux non prélevées dans la ressource naturelle (eaux grises, eaux de pluie, eaux usées traitées, eaux issues de processus industriels...) et peuvent contenir des agents biologiques pathogènes ou des substances chimiques dangereuses pouvant engendrer des risques sanitaires et professionnels. Les évolutions réglementaires récentes en France montrent une volonté accrue d'élargir l'utilisation de ces eaux, en maîtrisant les risques pour la santé publique (consommateurs, riverains). Ce cadre doit toutefois être complété par des mesures permettant d'assurer la prévention des risques professionnels.

Quelles eaux non conventionnelles peuvent être utilisées ?

Il existe de nombreux types d'eaux non conventionnelles. Étant donné les risques qu'elles peuvent présenter pour la santé, leur usage est encadré réglementairement. À l'heure actuelle, il existe une liste des ENC autorisées selon trois types d'usages (Cf. Tableau 1).

En complément, la réglementation interdit l'utilisation de certaines ENC :

- les eaux grises (y compris traitées), les eaux de pluie et les eaux usées traitées (EUT) pour les usages alimentaires (boisson, préparation et cuisson des aliments, vaisselle), l'hygiène corporelle, la brumisation et jeux d'eau;
- les eaux de pluie collectées sur des toitures contenant de l'amiante ou du plomb;
- les EUT dans les établissements recevant du public sensible¹, et dans les autres établissements recevant du public pendant les heures d'ouverture;



TABLEAU 1 →
Usages des ENC
réglementairement
encadrés.

USAGES	TYPES D'EAU NON CONVENTIONNELLE
Usages domestiques (nettoyage des sols intérieurs, lavage du linge...), y compris dans les locaux de travail¹	<ul style="list-style-type: none"> Eaux brutes (eaux de pluie issues des précipitations atmosphériques, exclusivement collectées à l'aval de surfaces inaccessibles aux personnes en dehors des opérations d'entretien ou de maintenance, eaux douces², eaux de puits et de forage) Eaux grises (issues des douches, baignoires, lavabos et lave-linge) Eaux de piscines à usage collectif Dans les installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE), en plus : <ul style="list-style-type: none"> eaux de pluies autres que celles définies plus haut eaux issues des douches de sécurité et lave-œil eaux d'exhaure (prélevées lors d'un drainage d'eaux issues d'une exsurgence, d'une remontée ou d'un affleurement de nappe souterraine et eaux issues des précipitations atmosphériques)
Usages non domestiques : agricoles, espaces verts et nettoyage urbain³	<ul style="list-style-type: none"> Eaux de pluie (issues des précipitations atmosphériques collectées à l'aval de surfaces inaccessibles aux personnes en dehors des opérations d'entretien et de maintenance) Eaux usées traitées provenant d'une station d'épuration urbaine ou industrielle
Usages en industrie agroalimentaire⁴	<ul style="list-style-type: none"> Eaux recyclées issues des matières premières alimentaires Eaux recyclées issues de processus, par exemple les eaux de lavage Eaux usées générées uniquement par une entreprise du secteur alimentaire et ayant fait l'objet d'un traitement complémentaire après la station d'épuration

1. Définis par les articles R.1322-87 à R.1322-113 du Code de la santé publique, complétés par le décret n° 224-796 [1], l'arrêté du 12 juillet 2024 [2] pour les établissements recevant du public (ERP) et les locaux de travail, et par l'arrêté du 14 mars 2025 [3] pour les installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE).

2. Eaux superficielles ou souterraines non salées autorisées au titre des articles L. 214-1 à L. 214-6 du Code de l'environnement.

3. Définis par les articles R.211-123 à R.211-138 du Code de l'environnement, complétés par des arrêtés pour l'arrosage d'espaces verts (autres qu'à l'échelle d'un bâtiment) [4], l'irrigation de culture [5] et le nettoyage urbain [6].

4. Définis par le Code de la santé publique (articles R.1322-76 à R. 1322-86), complété par l'arrêté du 8 juillet 2024 et une instruction [7,8].

- les eaux usées issues d'une installation de traitement reliée à un établissement de collecte, d'entreposage, de manipulation après collecte ou de transformation des sous-produits animaux de catégories 1 ou 2, à moins que ces eaux usées soient traitées thermiquement à 133 °C pendant vingt minutes sous une pression de 3 bars;
- les EUT sur des terrains saturés en eau ou à proximité d'une zone à risque (par exemple captage d'eau potable, zone de baignade...);
- pour les usages en industrie agroalimentaire:
 - les eaux usées issues du lavage des locaux et instruments susceptibles d'avoir été en contact avec des matériels à risque spécifiés (pouvant contenir des agents responsables d'encéphalopathies spongiformes transmissibles);
 - les eaux usées issues d'une installation de traitement reliée à un établissement de collecte, d'entreposage, de manipulation après collecte ou de transformation des sous-produits animaux de catégories 1 ou 2 présentant un risque pour la santé publique, ou directement issues de cet établissement;
 - les eaux usées issues d'une station qui ne respectent pas les valeurs limites d'émissions de la réglementation relative aux installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE), ou dont les boues ne répondent pas aux exigences de qualité pour un épandage sur des sols agricoles;
 - les eaux présentant une concentration d'un agent chimique suffisante pour induire une

toxicité aiguë par contact ou ingestion;
– les saumures et concentrats produits par les dispositifs de traitement des eaux.

Quels sont les risques liés à une exposition aux ENC ?

Quels sont les dangers liés aux ENC ?

Les ENC peuvent contenir des micro-organismes et des substances chimiques dangereux pour la santé humaine. La qualité des eaux variant selon leur origine environnementale ou industrielle et selon leurs traitements, il est difficile d'établir une liste exhaustive des dangers susceptibles d'être présents dans les ENC.

Elles peuvent contenir des micro-organismes responsables de gastro-entérites (entérovirus, *Campylobacter*, *Escherichia coli*, *Salmonella*, parasites), d'infections respiratoires (*Legionella pneumophila*...), ou cutanées (*Staphylococcus*, *Aeromonas*, *Pseudomonas*...). De nombreuses substances chimiques peuvent également être retrouvées dans les ENC, comme des métaux lourds, des résidus pharmaceutiques, des composés organiques persistants, des solvants, des hydrocarbures, des pesticides, des sous-produits de désinfection...

La qualité de ces eaux peut également se dégrader lors du stockage après traitement et lors de leurs utilisations répétées. En outre, le stockage de l'eau peut favoriser la prolifération de moustiques tigres, vecteurs potentiels de virus responsables de la dengue, du chikungunya et du virus Zika.



© Claude Almodovar pour l'INRS / 2020

Enfin, l'utilisation d'ENC peut avoir des effets indirects sur la qualité de l'eau potable. En effet, celle-ci, moins utilisée au profit des ENC, séjourne plus longtemps dans les canalisations, ce qui favorise le développement du biofilm, réservoir de micro-organismes dans le réseau d'eau potable.

Comment les salariés peuvent-ils être exposés aux ENC ?

Différents métiers peuvent être concernés : personnel de station d'épuration, agents de maintenance des réseaux d'eau, agriculteurs ou ouvriers agricoles, agents d'entretien des espaces verts et urbains, opérateurs en lien avec des procédés utilisant des eaux recyclées, travailleurs du BTP...

Selon les tâches réalisées, le personnel peut être exposé :

- par inhalation, en cas d'opération générant des aérosols (nettoyage avec de l'eau sous pression, aspersion...);
- par ingestion, lors de contact main-bouche avec l'ENC ou lors d'une connexion accidentelle du réseau d'ENC avec le réseau d'eau potable;
- par contact cutané ou en portant les mains souillées aux muqueuses (yeux, lèvres...).

Il convient d'évaluer les risques des ENC au cas par cas et de mettre en œuvre des mesures pouvant prévenir ces risques.

Mesures de prévention

Qualité des eaux

La première mesure de prévention consiste à supprimer ou réduire les dangers des ENC. Dans ce but, plusieurs traitements peuvent être combinés pour améliorer la qualité des ENC, tels que des procédés d'adsorption, de filtration membranaire, d'oxydation ou de désinfection.

Pour les usages réglementés, il convient de respecter les exigences de suivi de la qualité physico-chimique et microbiologique des ENC. Les prélèvements d'eau pour contrôle sont effectués au point de sortie des eaux usées traitées (le cas échéant) et aux points d'usage, afin de connaître au mieux le niveau d'exposition des opérateurs ; mais il peut également être pertinent de prélever en d'autres points de l'installation, comme les réservoirs de stockage d'eau. Selon l'évaluation des risques, l'entreprise peut ajouter d'autres critères physico-chimiques ou microbiologiques. De même, la fréquence des contrôles peut être augmentée selon la vitesse de dégradation de la qualité de l'eau constatée par analyses.

Pour les usages non réglementés, ces exigences peuvent être prises comme base pour contrôler la qualité des ENC, charge à l'entreprise d'évaluer les risques, de faire le suivi de la qualité des eaux et de mettre en œuvre les mesures de prévention adéquates.

Nettoyage d'un camion-benne à ordures ménagères.



PARAMÈTRES MESURÉS	QUALITÉ A+	QUALITÉ A
<i>Escherichia coli</i> (UFC ¹ /100 mL)	0 UFC/100 mL (non détecté dans les ICPE)	≤ 10
Entérocoques intestinaux	0 UFC/100 mL (non détecté dans les ICPE)	/
<i>Legionella pneumophila</i> (pour les systèmes générant des aérosols)	≤ 10 UFC/L (non détecté dans les ICPE)	
Turbidité (NFU ²)	≤ 2	≤ 5
Carbone organique total (mg/L)	≤ 5	≤ 10
En cas de chloration : chlore libre résiduel	Absence d'odeur Pour l'arrosage des espaces verts, les eaux impropres à la consommation humaine, notamment issues des piscines, faisant l'objet d'un traitement par le chlore, la concentration en chlore total est inférieure à 1 mg/L	
pH	Entre 5,5 et 8,5	

1. UFC : unité formant colonie. 2. NFU : unité néphélobimétrique.

↑ TABLEAU 2 Critères de qualité des ENC à usage domestique [2, 3].

Usages domestiques	Eaux de pluie, eaux douces, eaux de puits et de forage			Eaux grises et eaux issues des piscines à usage collectif			Autres types d'eaux
	ERP hors public sensible	ERP public sensible	ICPE	ERP hors public sensible	ERP public sensible	ICPE	ICPE
Lavage du linge	A+	A+	A+				
Nettoyage des sols en intérieur	/	/	/				
Arrosage des jardins potagers	/	/	/				
Évacuation des <i>excreta</i>	/	/	/	A+	A+	A+	
Nettoyage des surfaces extérieures (dont lavage des véhicules)	/	/	/	A	A	A	
Arrosage des toitures et murs végétalisés et espaces verts à l'échelle du bâtiment/ bassin d'ornement	/	/	/	A	A	A	
Alimentation des fontaines décoratives non destinées à la consommation humaine	/	A+	/	A+	A+	A+	

A+ et A : critères de qualité des eaux (Cf. Tableau 2). / : sans critères de qualité.

ERP :

- Sans procédure au titre du Code de la santé publique [2].
- Déclaration au préfet au titre de l'article R. 1322-100 du Code de la santé publique [2].
- Autorisation du préfet au titre de l'article R. 1322-101 du Code de la santé publique [2].
- Expérimentation au titre de l'article 2 du décret n° 2024-796 du 12 juillet 2024 [1].

ICPE :

- Utilisation possible dans le respect des prescriptions de l'arrêté [3].
- Encadré par arrêté préfectoral avant sa mise en œuvre. Critères de qualité des eaux à déterminer, sur proposition de l'exploitant dans un dossier d'utilisation [3].

↑ TABLEAU 3 Usages domestiques possibles en fonction des types d'eaux et procédure administrative à respecter [2,3].

→ Usages domestiques

Les usages domestiques sont définis par l'article R. 1321-1-1 du Code de la santé publique, et comprennent notamment le lavage de sols intérieurs, le lavage du linge, l'alimentation des fontaines décoratives... Selon les ENC et les usages, deux niveaux de qualité A+ et A sont définis (Cf. Tableaux 2 et 3). Par exemple, la réutilisation des eaux grises et des eaux issues des piscines à usage collectif nécessite un niveau de qualité A+ pour les fontaines décoratives ou l'évacuation des *excreta*, et un niveau de qualité A pour

le nettoyage des surfaces extérieures et l'arrosage des espaces verts à l'échelle du bâtiment. Ces niveaux de qualité sont attendus au point le plus proche de l'usage ou le plus représentatif de la qualité d'eau distribuée [2,3]. La fréquence de surveillance des différents paramètres dépend du type d'ENC et du type d'établissement (Cf. Tableau 4). À cela s'ajoutent des dispositions spécifiques au lavage du linge au sein des blanchisseries et laveries, qui prévoient une surveillance semestrielle des eaux brutes pour les paramètres suivants [3] :

PARAMÈTRES MESURÉS	EAUX BRUTES		EAUX GRISES ET EAUX DE PISCINES À USAGE COLLECTIF	
	ERP hors public sensible et ICPE pour le lavage du linge uniquement	ERP public sensible pour le lavage du linge et l'alimentation de fontaines décoratives	ERP hors public sensible et ICPE	ERP public sensible
<i>Escherichia coli</i>	Une fois à la mise en service	Deux fois par an	Deux fois par an	Six fois par an
Entérocoques intestinaux	Une fois à la mise en service	Deux fois par an	Deux fois par an	Six fois par an
<i>Legionella pneumophila</i> (en période estivale ou en début de saison si usage saisonnier)	Sans objet	Une fois par an	Une fois par an	Une fois par an
Turbidité	Une fois à la mise en service	En continu ou fréquence adaptée au bon fonctionnement du système ¹ (selon spécifications techniques du fabricant) et <i>a minima</i> deux fois par an	Fréquence adaptée au bon fonctionnement du système (selon spécifications techniques du fabricant)	En continu ou fréquence adaptée au bon fonctionnement du système (selon spécifications techniques du fabricant) et <i>a minima</i> six fois par an
Carbone organique total	Une fois à la mise en service	Deux fois par an	Deux fois par an	Six fois par an
Chlore libre résiduel en cas de chloration	Une fois à la mise en service	En continu ou fréquence adaptée au bon fonctionnement du système (selon spécifications techniques du fabricant)	Fréquence adaptée au bon fonctionnement du système (selon spécifications techniques du fabricant)	En continu ou fréquence adaptée au bon fonctionnement du système (selon spécifications techniques du fabricant)
pH	Une fois à la mise en service	Deux fois par an	Deux fois par an	Six fois par an

1. Système : ensemble des installations de collecte, de transport, de stockage, de traitement et de distribution des eaux.

↑ TABLEAU 4 Fréquence de surveillance en fonction des types d'établissement et d'eaux utilisées [2,3].

Nettoyage de surfaces en contact avec des denrées alimentaires.

- flore aérobie revivifiable à 22 °C ≤ 500 UFC/mL; et à 36 °C ≤ 50 UFC/mL;
- coliformes totaux, *Escherichia coli*, *Pseudomonas aeruginosa* : non détecté/100 mL.

Pour les autres eaux, les critères de qualité et la périodicité des contrôles sont définis par arrêté préfectoral.

L'usage domestique des ENC se développant progressivement, différentes procédures administratives (déclaration, autorisation, expérimentation...) existent selon les types d'eaux, d'usage et d'établissement (Cf. Tableau 3).

→ Usages non domestiques

Le cadre réglementaire concerne l'arrosage d'espaces verts (hors bâtiment), l'irrigation agricole et les usages urbains. Aucun critère ni aucune procédure ne sont demandés pour l'usage non domestique des eaux de pluie. L'usage interne des eaux usées traitées (EUT) dans l'enceinte d'une ICPE est soumis à la réglementation spécifique du site, alors que les usages externes sont soumis à une procédure d'autorisation, avec cinq niveaux de qualité définis par arrêtés [4,6] (A+, A, B, C et D) (Cf. Tableau 5). La qualité A+ a été introduite pour les usages urbains, par exemple le nettoyage des



© Fabrice Dimier pour l'INRS / 2017



PARAMÈTRES	NIVEAU DE QUALITÉ DES EUT				
	A+	A	B	C	D
Matières en suspension (mg/L)	≤ 10	≤ 10	Conforme à la réglementation des rejets d'eaux usées traitées pour l'exutoire de la station hors période d'utilisation		
Demande biologique en oxygène sur cinq jours (mg/L)	≤ 10	≤ 10			
<i>Escherichia coli</i> (nombre/100 mL)	≤ 1	≤ 10	≤ 100	≤ 1000	≤ 10 000
Bactériophages ARN-F spécifiques (nombre/100 mL) ou phages somatiques (nombre/100 ml)	≤ 10	≤ 10	≤ 100	≤ 1000	≤ 10 000
<i>Clostridium perfringens</i> (nombre/100 mL)	≤ 10	≤ 10	≤ 100	≤ 1000	≤ 10 000
Turbidité (NFU ¹)	≤ 5	≤ 5	–	–	–
Œufs d'helminthes pour l'irrigation des pâturages et fourrage frais (œufs/L)	≤ 1				
Légionelles lorsqu'il existe un risque de formation d'aérosols (<i>L. spp.</i> pour l'irrigation et l'arrosage, <i>L. pneumophila</i> pour le nettoyage urbain)	< 1 000 UFC ² /L				

1. NFU : unité néphélométrique. 2. UFC : unité formant colonie.

↑ **TABLEAU 5**
Critères de qualité des EUT pour usage non domestique [4,6].

ouvrages d'art (Cf. *Tableau 6*). En revanche, aucun critère de qualité n'est exigé pour l'hydrocurage de réseaux d'assainissement et le nettoyage des équipements associés, l'hydrocurage des réseaux d'eaux pluviales, les opérations sur installation d'assainissement non collectif, le nettoyage des bennes à ordures et des quais de déchetterie. Pour certains usages, des eaux de niveau de qualité inférieur peuvent être employées sous réserve de mettre en place des mesures barrières, comme arroser à distance des zones accessibles au public, ou en dehors des heures d'ouverture au public, irriguer de façon localisée, peler les fruits et légumes avant leur vente... Ces mesures, visant à limiter les risques pour la santé publique, doivent être complétées par des mesures limitant les risques professionnels. La fréquence de surveillance de la qualité des EUT varie selon le niveau de qualité de l'eau et les indicateurs suivis (Cf. *Tableau 7*).

→ Usages en agroalimentaire

Ces usages concernent uniquement ceux prévus dans le processus de transformation des denrées destinées à l'alimentation humaine. Les exigences minimales de qualité d'eau correspondent principalement à celles des eaux destinées à la consommation humaine (EDCH) (Cf. *Tableau 8*). Dans certains cas, l'exploitant doit fixer les critères pertinents à suivre selon son analyse des dangers. Cette analyse prend notamment en compte les produits utilisés dans l'entreprise et sous-produits générés, les risques d'accumulation de produits chimiques et d'agents biologiques en cas d'utilisation en boucle des ENC. La conformité de la qualité des eaux est vérifiée à une fréquence déterminée par l'exploitant. La réutilisation des eaux usées traitées recyclées est soumise à autorisation préfectorale, les eaux recyclées et de processus sont soumises à déclaration.

↓ **TABLEAU 6**
Usages non domestiques possibles en fonction du niveau de qualité des EUT.

Type d'usage		Niveau de qualité des EUT				
		A+	A	B	C	D
Arrosage des espaces verts [4]	Ouverts au public	ND ¹	■	■	■	■
	Dont l'accès au public est restreint		■	■	■	■
Irrigation [5]	Cultures vivrières consommées crues (partie comestible en contact avec l'eau)		■	■	■	■
	Cultures vivrières consommées crues (partie comestible sans contact avec l'eau), cultures vivrières transformées, cultures non vivrières (hors celles ci-dessous)		■	*	■	■
	Fourrage frais et pâturage		■	■	■	■
	Cultures industrielles, énergétiques et semencières		■	■	■	■
Usages urbains [6]	Nettoyage de voirie par balayeuse sans lance d'aspersion		■	■	■	■
	Nettoyage des accotements sans lance d'aspersion		■	■	■	■
	Nettoyage de voirie par balayeuse avec lance d'aspersion		■	■	■	■
	Nettoyage des ouvrages d'art		■	■	■	■

1. ND : non défini. * L'irrigation pour l'arboriculture fruitière est interdite pendant la période allant de la floraison à la cueillette pour les fruits non transformés, sauf en cas d'irrigation au goutte-à-goutte.

■ Autorisé ■ Interdit ■ Possible si mise en place de barrières

PARAMÈTRES	NIVEAU DE QUALITÉ DES EUT			
	A+	A	B	C OU D
Matières en suspension	Hebdomadaire	Hebdomadaire	Irrigation : conforme à la directive 91/271/CEE	
			Arrosage espaces verts : tous les 15 jours	Arrosage espaces verts : mensuel
Demande biologique en oxygène sur cinq jours	Hebdomadaire	Hebdomadaire	Irrigation : conforme à la directive 91/271/CEE	
			Arrosage espaces verts : tous les 15 jours	Arrosage espaces verts : mensuel
<i>Escherichia coli</i>	Hebdomadaire	Hebdomadaire	Irrigation : hebdomadaire	Irrigation : tous les 15 jours
			Arrosage espaces verts : tous les 15 jours	Arrosage espaces verts : mensuel
Pour les paramètres ci-dessous, la fréquence est définie pour l'irrigation des cultures et le nettoyage urbain, non pour l'arrosage d'espaces verts				
Coliphages	Hebdomadaire	Hebdomadaire	Hebdomadaire	Tous les 15 jours
<i>Clostridium perfringens</i>	Hebdomadaire	Hebdomadaire	Hebdomadaire	Tous les 15 jours
Turbidité	En continu	En continu	–	–
Légionelles (le cas échéant)	Tous les 15 jours			
Nématodes intestinaux (le cas échéant)	Deux fois par mois ou tel que déterminé par l'exploitant d'installation de production, en fonction du nombre d'œufs présents dans les eaux usées entrant dans l'installation de production			

→ Autres usages industriels

La réutilisation des ENC dans les process industriels ou dans le secteur du bâtiment échappe encore à un cadre réglementaire précis. Aucun critère de qualité d'eau n'est actuellement exigé pour les usages industriels, tels que le lavage des équipements et des véhicules, le recyclage des eaux de process, ou encore l'abattage de poussières. Pour ces usages, l'entreprise doit définir des critères de qualité, des points de prélèvement et

des fréquences de contrôles, afin de protéger les salariés exposés. Il convient par exemple de tenir compte du risque lié aux légionelles en cas d'utilisation de procédés générant des aérosols.

Conception des réseaux d'eaux

Une mauvaise conception ou un réseau mal identifié peut entraîner un retour d'eau et donc une contamination du réseau d'eau potable par les ENC. Le réseau d'ENC doit donc être clairement

↑ **TABLEAU 7**
Fréquences minimales de surveillance selon le niveau qualité des EUT et leurs usages non domestiques [4,6].

CATÉGORIES D'USAGE	EXIGENCES MINIMALES DE QUALITÉ	
	EUT	EAUX ISSUES DE MATIÈRES PREMIÈRES ET EAUX DE PROCESSUS
Comme ingrédient entrant dans la composition du produit fini	Interdit	Paramètres bactériologiques : valeurs limites fixées pour les EDCH [9] Paramètres physico-chimiques pertinents selon l'analyse des dangers
Contact direct ou indirect avec les denrées alimentaires, sans étape de maîtrise	Valeurs limites fixées pour les EDCH [9]	Paramètres bactériologiques : valeurs limites fixées pour les EDCH [9] Paramètres physico-chimiques pertinents selon l'analyse des dangers
Contact direct ou indirect avec les denrées alimentaires, avec étape de maîtrise	Paramètres bactériologiques : valeurs limites fixées pour les EDCH [9] Paramètres physico-chimiques pertinents selon l'analyse des dangers	Eau propre, prenant en compte les paramètres pertinents selon l'analyse des dangers
Sans contact (ex. : nettoyage des locaux)	Paramètres bactériologiques : <i>Escherichia coli</i> : 0/100 mL Entérocoques : 0/100 mL	Paramètres pertinents selon l'analyse des dangers

← **TABLEAU 8**
Exigences de qualité en fonction des types d'eaux et des catégories d'usage en agroalimentaire [7].





© Guillaume J. Plisson pour l'INRS / 2020

Utilisation d'un brumisateur d'eau dans le secteur du BTP pour abattre les polluants.

différencié du réseau d'eau potable et repéré de façon explicite. Le cas échéant, l'appoint d'eau potable est assuré par surverse totale.

Les points de soutirage d'ENC doivent être :

- éloignés des points d'eau potable;
- munis d'un dispositif de verrouillage;
- signalés par l'affichage « eau non potable »;
- situés dans un local fermé non accessible au public.

Toutes les précautions doivent être mises en place pour limiter la stagnation de l'eau (absence de bras mort, vanne permettant la vidange du réseau), la formation de dépôt (matériaux facilement nettoyables et ne favorisant pas le biofilm, dispositif de filtration en amont des réservoirs de stockage...) et les élévations de température (calorifugeage des installations...). Les réservoirs doivent être protégés contre l'introduction et la prolifération d'animaux et d'insectes.

En l'absence de réseau de distribution d'ENC, seul du matériel spécifiquement dédié à cet usage peut être utilisé (camion-citerne par exemple).

Stockage de l'eau

La stagnation et les températures élevées pendant le stockage de l'eau peuvent favoriser le développement microbien. Les réservoirs de stockage doivent donc être placés à l'abri de la chaleur, et l'eau stockée pendant un temps défini par des analyses successives concluantes, sachant que les textes indiquent une durée maximale de 72 heures après traitement. Cette durée permet de dimensionner le volume des citernes de stockage afin d'éviter les remises à niveau sans vidange ni nettoyage.

En cas d'ajout de désinfectant, il convient de suivre sa concentration afin d'éviter toute dégradation de la qualité de l'eau dans les réservoirs.

Entretien et maintenance des équipements

Les réseaux d'ENC doivent être régulièrement maintenus afin d'identifier tout dysfonctionnement. La maintenance comprend notamment le remplacement des filtres, l'entretien de la filière de traitement, la manœuvre des vannes et des

points de soutirage, ainsi que la vidange et le nettoyage des équipements de stockage. Ces opérations sont réalisées par du personnel qualifié, à une fréquence adaptée (au moins une fois par an).

À noter : Si les traitements permettent de produire des eaux de bonne qualité à partir d'eaux fortement polluées, la défaillance des systèmes de traitement (par exemple, le colmatage des procédés membranaires) doit être prise en compte dans l'analyse des risques. Il est donc important de mettre en place un contrôle de l'efficacité de la filière de traitement des eaux.

Mesures de prévention techniques et organisationnelles

L'accès aux ENC doit être limité aux seules personnes autorisées, notamment en plaçant les points de soutirage dans un local fermé ou dans une zone clôturée, ou en utilisant des vannes condamnables. De plus, l'utilisation d'ENC en dehors des horaires d'ouverture des bâtiments permet de limiter l'exposition du personnel.

Certaines opérations peuvent être automatisées afin de réduire les interventions humaines (nettoyage, remplissage et vidange automatique, détection des fuites...). Les procédés générant des aérosols doivent être limités. À défaut, ils doivent être confinés et le local ventilé (opérations effectuées dans une enceinte ventilée, bassin d'aération de station d'épuration dans un local fermé, mise en place de dispositifs tels que des pare-gouttelettes...).

Mesures de protection individuelle

En cas de risque résiduel après mise en place de mesures de prévention collective, le port d'équipements de protection individuelle (EPI) peut être préconisé : combinaison imperméable, gants étanches, lunettes et appareil de protection respiratoire en cas de risque d'aérosols. Les EPI réutilisables doivent être correctement entretenus et nettoyés après chaque intervention.

Dans tous les cas, la mise à disposition d'eau potable et de savon reste indispensable pour assurer l'hygiène des travailleurs, qui doivent se laver les mains après contact avec les ENC et après avoir ôté leurs EPI. Les salariés doivent être informés et formés sur les risques liés à l'utilisation des ENC et sur les mesures de prévention qui en découlent. Sur proposition du service de prévention et de santé au travail, des vaccinations peuvent également être proposées par l'employeur.

Conclusion

Même si la réglementation encadrant les usages des ENC participe à la prévention des risques professionnels, leur utilisation soulève des enjeux

importants en matière de santé et sécurité au travail. Les risques professionnels doivent être évalués en identifiant les dangers chimiques et biologiques présents dans ces eaux et les conditions d'exposition, tout particulièrement dans le cas des usages industriels pour lesquels aucun critère de qualité de l'eau n'est actuellement exigé. La démarche de prévention consiste à agir le plus en amont possible, par la maîtrise et la surveillance de la qualité des eaux utilisées et au niveau de la conception des installations. En complément, des mesures techniques, organisationnelles et individuelles adaptées doivent être mises en œuvre. ●

1. Mentionnés à l'article R. 1322-90 du Code de la santé publique (notamment crèches, établissements de santé...).
Accessible sur : <https://www.legifrance.gouv.fr/>

BIBLIOGRAPHIE

- [1] **DÉCRET N° 2024-796 DU 12 JUILLET 2024** relatif à des utilisations d'eaux impropres à la consommation humaine. Accessible sur : www.legifrance.gouv.fr
- [2] **ARRÊTÉ DU 12 JUILLET 2024** relatif aux conditions sanitaires d'utilisation d'eaux impropres à la consommation humaine pour des usages domestiques pris en application de l'article R. 1322-94 du Code de la santé publique. Accessible sur : www.legifrance.gouv.fr
- [3] **ARRÊTÉ DU 14 MARS 2025** relatif à l'utilisation d'eaux impropres à la consommation humaine pour des usages domestiques au sein des installations classées pour la protection de l'environnement. Accessible sur : www.legifrance.gouv.fr
- [4] **ARRÊTÉ DU 14 DÉCEMBRE 2023** relatif aux conditions de production et d'utilisation des eaux usées traitées pour l'arrosage d'espaces verts. Accessible sur : www.legifrance.gouv.fr
- [5] **ARRÊTÉ DU 18 DÉCEMBRE 2023** relatif aux conditions de production et d'utilisation des eaux usées traitées pour l'irrigation de cultures. Accessible sur : www.legifrance.gouv.fr
- [6] **ARRÊTÉ DU 8 SEPTEMBRE 2025** relatif aux conditions de production et d'utilisation des eaux usées traitées pour la propreté urbaine et modifiant l'arrêté du 14 décembre 2023 relatif aux conditions de production et d'utilisation des eaux usées traitées pour l'arrosage d'espaces verts et l'arrêté du 18 décembre 2023 relatif aux conditions de production et d'utilisation des eaux usées traitées pour l'irrigation de cultures. Accessibles sur : www.legifrance.gouv.fr
- [7] **ARRÊTÉ DU 8 JUILLET 2024** relatif aux eaux réutilisées en vue de la préparation, de la transformation et de la conservation dans les entreprises du secteur alimentaire de toutes denrées et marchandises destinées à l'alimentation humaine. Accessible sur : www.legifrance.gouv.fr
- [8] **INSTRUCTION TECHNIQUE DGAL/SDSSA/2025-173** - Modalités d'autorisation et de déclaration des eaux impropres à la consommation, recyclées pour la préparation et la conservation de toutes denrées et marchandises destinées à l'alimentation humaine, 2025, 44 p. Accessible sur : <https://agriculture.gouv.fr>
- [9] **ARRÊTÉ DU 11 JANVIER 2007** relatif aux limites et références de qualité des eaux brutes et des eaux destinées à la consommation humaine mentionnées aux articles R. 1321-2, R. 1321-3, R. 1321-7 et R. 1321-38 du Code de la santé publique. Accessible sur : www.legifrance.gouv.fr

Actualité [amiante]

MESURE DES FIBRES D'AMIANTE EN SANTÉ AU TRAVAIL

Rôle et pertinence de la microscopie électronique à transmission analytique (Meta)

L'INRS rappelle que la microscopie électronique à transmission analytique (Meta) s'impose aujourd'hui comme la seule méthode valide et adaptée pour la mesure de l'exposition professionnelle à l'amiante. Pourquoi ? Cette méthode permet de prendre en compte plusieurs exigences : nécessité d'une identification chimique et cristallographique fiable et d'un comptage exhaustif de toutes les fibres d'amiante, y compris les fibres fines et courtes présentes dans les environnements professionnels.

MEASURING ASBESTOS FIBRES AND OCCUPATIONAL HEALTH: ROLE AND RELEVANCE OF ANALYTICAL TRANSMISSION ELECTRON MICROSCOPY (ATEM) – INRS (French national research and safety institute for the prevention of occupational accidents and diseases) reminds readers that, today, analytical transmission electron microscopy (ATEM) is the only valid and appropriate method to measure occupational exposure to asbestos. The reasons for this exclusivity are that this method meets several requirements. In particular, the need for reliable chemical and crystallographic identification and for exhaustive counting of all asbestos fibres, including fine and short fibres present in occupational environments.

BENOÎT COURRIER
INRS, direction des Études et de la recherche

LUC LABORDE
INRS, département Information et communication

En France, la norme NF X 43-050 prescrit l'usage de la microscopie électronique à transmission analytique (Meta) pour la mesure réglementaire de l'exposition professionnelle à l'amiante. Cette méthode constitue actuellement la seule technique capable de remplir l'ensemble des exigences métrologiques nécessaires à une évaluation fiable de l'exposition.

Spécificités et exigences métrologiques de la mesure des fibres d'amiante en prévention des risques professionnels

L'absence de seuil démontré d'innocuité pour l'exposition aux fibres d'amiante implique des exigences métrologiques particulièrement strictes. Les outils d'évaluation doivent permettre non seulement l'identification précise des fibres, fondée sur la caractérisation fiable de leur composition chimique et de leur structure cristallographique, mais également la quantification sensible et reproductible des fibres inhalables présentes dans l'air des lieux de travail.

L'amiante se distingue par son caractère particulière fibreux et par sa définition conjointe minéralogique et morphologique. Les six variétés d'amiante historiquement exploitées (chrysotile et cinq amphiboles) possèdent une structure cristalline silicatée de tétraèdres SiO_4 , enrichie en éléments caractéristiques tels que le magnésium, le fer ou le sodium, dont l'analyse permet de déterminer la variété minéralogique. Cette diversité chimique et structurale constitue un prérequis majeur pour leur classification analytique.

Les fibres d'amiante présentes dans les environnements professionnels sont regroupées en trois types :

- fibres OMS : longueur (L) > 5 μm , diamètre (d) < 3 μm , rapport L/d ≥ 3 ;
- fibres fines d'amiante (FFA) : diamètre < 0,2 μm ;
- fibres courtes d'amiante (FCA) : longueur < 5 μm .

Les fibres fines et courtes d'amiante, souvent abondantes dans les atmosphères de travail, jouent un rôle déterminant dans la quantification réelle de l'empoussièrement et leur présence importante sous la sensibilité analytique de certaines

techniques impose l'usage de méthodes de très haute résolution.

Pour répondre aux besoins de la prévention, une méthode de mesure fiable doit donc satisfaire simultanément à trois critères fondamentaux :

- une résolution suffisante pour visualiser l'ensemble du spectre des fibres, y compris les plus courtes et les plus fines ;
- une capacité d'analyse chimique permettant de connaître la composition chimique des fibres ;
- la détermination de la structure cristallographique, indispensable pour distinguer les différentes variétés d'amiante, notamment chrysotile et amphiboles.

Résolution et capacité de détection de la méthode Meta pour les mesures d'exposition

La méthode « Meta » offre une résolution nanométrique permettant l'observation détaillée des fibres d'amiante de très faible diamètre, notamment celles inférieures à 0,2 µm. Cette caractéristique est essentielle pour garantir le comptage exhaustif des fibres fines, dont une large proportion échappe aux autres techniques optiques ou électroniques moins résolutes.

À titre de comparaison, la microscopie électronique à balayage analytique conventionnelle (Meba/Sem), bien qu'utile pour l'analyse des matériaux ou les diagnostics exploratoires, présente une résolution insuffisante pour identifier les fibres fines d'amiante.

Identification élémentaire et cristallographique

L'analyse « Meta » associe la microanalyse X par spectrométrie dispersive en énergie (EDS), permettant la détermination précise de la composition chimique des fibres, et la diffraction électronique en aire sélectionnée (SAED), permettant l'identification de leur structure cristallographique par l'interprétation des motifs de diffraction.

La combinaison « EDS + SAED » rend possible une identification minéralogique complète, y compris dans des matrices complexes contenant des fibres amiante et non amiante. La « Meta » est ainsi capable de distinguer sans ambiguïté les fibres de chrysotile des amphiboles, distinction indispensable pour l'évaluation des risques et la traçabilité des expositions.

En revanche, la « Meba » ne permet pas la détermination cristallographique et son aptitude à différencier certaines fibres minérales non amiante de fibres d'amiante est limitée, ce qui compromet la fiabilité du comptage dans un contexte de santé au travail.

Limites des autres techniques et justification du choix exclusif de la Meta

Bien que la méthode « Meba » présente des avantages opérationnels dans les domaines du diagnos-



© Gaël Kerbaol / INRS / 2018

tic des matériaux et de l'analyse minéralogique de surface, elle souffre de limitations majeures lorsqu'elle est utilisée pour la mesure d'exposition professionnelle :

- résolution insuffisante pour détecter les fibres fines ;
- impossibilité de déterminer la nature cristallographique ;
- risque accru de confusion avec des fibres non amiante.

Ces limites compromettent la précision, la représentativité et la robustesse des mesures. ●

Préparation d'un microscope électronique à transmission pour le comptage des fibres d'amiante.

POUR EN SAVOIR +

- INRS – *Dossier Web Amiante*. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/risques/amiante/ce-qu-il-faut-retenir.html>
- INRS – *Rapport d'activité 2025 sur les mesures d'exposition à l'amiante Meta (période du 1^{er} juillet 2012 au 31 décembre 2024)*. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/publications/hst/bases-de-donnees.html> (voir en bas de page : « Base de données Scola »)
- INRS – *Base de données Scol@miante*. Accessible sur : <https://scolamiante.inrs.fr/Scolamiante/Accueil>
- INRS – *Amiante : définir le niveau d'empoussièrement d'un processus « sous-section 3 »*. ED 6367. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%206367>
- INRS – *Conseils pour commander et décrypter des analyses d'amiante dans les matériaux et dans l'air*. ED 6554. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%206554>

Actualité juridique

MISE EN ŒUVRE DES PRÉCONISATIONS DU MÉDECIN DU TRAVAIL DANS TOUS LES LIEUX OÙ LE SALARIÉ INTERVIENT

Cour de cassation, chambre sociale, 11 juin 2025, n° 24-13.083.

PÔLE
INFORMATION
JURIDIQUE
INRS,
département
Études, veille
et assistance
documentaires

Faits et procédure

Un salarié, engagé en qualité de conducteur routier, est victime d'un accident du travail. Lors de sa visite médicale, le médecin du travail indique dans l'attestation de suivi individuel de son état de santé qu'il peut reprendre son travail, à condition d'être affecté sur un poste avec transpalettes électriques le premier mois avant d'envisager la suite.

Un mois plus tard, le médecin du travail le déclare apte à son poste, en précisant qu'il ne doit ni porter de charge supérieure à 10 kg, ni tirer ou pousser de charge pendant cinq mois, sauf à l'aide d'un chariot électrique.

L'employeur l'affecte alors sur un autre site afin qu'il effectue des livraisons auprès de différents magasins.

Quelques mois plus tard, le salarié est placé en arrêt de travail. Il demande alors la résiliation judiciaire de son contrat de travail, soutenant que sur les sept magasins auxquels il a été affecté pour la livraison, six d'entre eux n'étaient pas équipés de chariot électrique. En ne vérifiant pas que les lieux de livraison qui lui étaient attribués respectaient les préconisations du médecin du travail, son employeur a manqué à son obligation de sécurité. À l'issue de l'examen médical de reprise, le médecin du travail déclare cette fois le salarié inapte à son poste avec impossibilité de reclassement. Le salarié est alors licencié pour inaptitude.

Décision des juges du fond (conseil de prud'hommes et cour d'appel)

Tant en première instance qu'en appel, le salarié est débouté de ses demandes concernant la résiliation de son contrat de travail et de dommages-intérêts pour le licenciement sans cause réelle et sérieuse. La cour d'appel reconnaît que l'employeur ne s'est

pas assuré que les lieux de livraison imposés à son salarié étaient tous équipés de chariot électrique. Toutefois, elle considère que l'employeur n'a pas pour autant commis de manquement à son obligation de sécurité, dans la mesure où le salarié intervenait dans des sociétés tierces, qu'il ne pouvait pas avoir connaissance de l'absence de chariot électrique et, en tout état de cause, qu'il appartenait au salarié de l'alerter sur ce point.

Contestant cette décision, le salarié forme alors un pourvoi en cassation.

Décision de la Cour de cassation

La Cour de cassation casse et annule l'arrêt rendu par la cour d'appel.

Elle rappelle que, conformément aux dispositions des articles L. 4624-3 et L. 4624-6 du Code du travail :

- le médecin du travail peut proposer, par écrit et après échange avec le salarié et l'employeur, des mesures individuelles d'aménagement, d'adaptation ou de transformation du poste de travail, ou des mesures d'aménagement du temps de travail justifiées par des considérations relatives notamment à l'âge ou à l'état de santé physique et mental du travailleur ;
- l'employeur est tenu de les prendre en considération ; en cas de refus, il doit faire connaître par écrit au travailleur et au médecin du travail les motifs qui s'opposent à ce qu'il y soit donné suite¹.

Dans cette affaire, il résultait des protocoles de sécurité élaborés pour les lieux de livraison attribués au salarié, que six n'étaient pas équipés d'un transpalette électrique, contrairement aux préconisations du médecin du travail. Or, celles-ci étaient justifiées par l'objectif de préserver la santé du



© Gaël Kerbaol / INRS / 2019

salarié. L'employeur, tenu d'une obligation de sécurité, doit soit appliquer les propositions émises par le médecin du travail, soit lui faire connaître par écrit les motifs qui s'opposent à ce qu'il y soit donné suite.

Pour la cour d'appel, bien que les préconisations du médecin du travail ne soient pas respectées dans les entreprises clientes, aucun manquement à l'obligation de sécurité ne pouvait être reproché à l'employeur car il n'en avait pas été informé. Selon les juges du fond, il appartenait au salarié d'alerter l'employeur sur le fait que les lieux dans lesquels il effectuait sa tournée n'étaient pas équipés de chariot électrique.

Toutefois, en adoptant une telle solution, la cour d'appel a omis un principe essentiel : l'employeur doit s'assurer de l'effectivité des aménagements préconisés, même lorsque le salarié travaille chez un client.

Cet arrêt, conforme à la jurisprudence constante, permet de rappeler que, d'une part, les préconisations du médecin du travail s'imposent à l'employeur et, d'autre part, que ce dernier doit s'assurer de l'effectivité des mesures de prévention mises en place, en toutes circonstances et dans tous les lieux de travail du salarié.

Les préconisations du médecin du travail s'imposent à l'employeur

Tous les travailleurs bénéficient d'un suivi individuel de leur état de santé. Les modalités et la périodicité de ce suivi prennent en compte les

conditions de travail, l'état de santé et l'âge du travailleur, ainsi que les risques professionnels auxquels il est exposé.

Lors des visites réalisées dans le cadre de ce suivi individuel, le médecin du travail peut formuler des préconisations, que ce soit :

- dans le cadre d'un « suivi individuel simple » et de la visite d'information et de prévention (VIP) : le médecin du travail délivre alors une attestation de suivi, qui peut être accompagnée de préconisations d'aménagement ou de transformation du poste de travail ;
- dans le cadre d'un suivi individuel renforcé (SIR) si le salarié est exposé à des risques particuliers : le médecin du travail peut déclarer le salarié apte tout en émettant des préconisations d'aménagement, d'adaptation ou de transformation du poste de travail.

Ces préconisations ne peuvent être émises qu'après échange avec le salarié et l'employeur. Cet échange permet notamment à l'employeur de comprendre les préconisations et d'interroger le médecin du travail s'il estime que des précisions sont utiles à la mise en place de l'aménagement.

À noter : Les propositions de mesures individuelles d'aménagement, d'adaptation ou de transformation du poste de travail ou de mesures d'aménagement du temps de travail accompagnent toujours soit l'attestation de suivi, soit l'avis d'aptitude. Depuis le 1^{er} juillet 2025, ces propositions sont conformes au modèle figurant à l'annexe 4 de l'arrêté du 3 mars 2025 modifiant l'arrêté du 16 octobre 2017.



Lorsque le médecin du travail préconise un aménagement du poste de travail pour un salarié, l'aptitude à reprendre le poste n'est pas totale mais elle ne peut pour autant être interprétée comme un avis d'inaptitude, ni par l'employeur, ni par les juges du fond².

Il est de jurisprudence constante que les préconisations du médecin du travail s'imposent à l'employeur. C'est ainsi que, dans une autre affaire, la responsabilité de l'employeur a été engagée pour manquement à son obligation de sécurité, pour ne pas avoir fourni de support de poignet à son salarié qui exerçait un poste de façadier, pourtant préconisé par le médecin du travail³.

Dans l'arrêt du 11 juin 2025, ce n'est pas parce que le salarié effectuait ses missions dans des entreprises extérieures, clientes de l'employeur, qu'il avait pour autant l'obligation de l'informer en cas de non-conformité des lieux d'exercice de ses missions avec les préconisations du médecin du travail.

Au contraire, il appartenait à l'employeur de vérifier que les lieux dans lesquels le salarié effectuait sa tournée étaient bien équipés du matériel préconisé, nécessaire au salarié pour travailler sans aggraver son état de santé. Il ne peut être exigé de ce dernier qu'il prenne l'initiative d'avertir son employeur.

Certes, tel que le précise l'article L. 4122-1 du Code du travail, le salarié est tenu, en fonction de sa formation et selon ses possibilités, de prendre soin de sa santé et de sa sécurité.

Toutefois, cette disposition ne saurait remettre en cause l'obligation de sécurité à laquelle l'employeur est tenu. Ce dernier aurait dû s'assurer que l'ensemble des lieux dans lesquels le salarié intervenait permettait le respect des préconisations du médecin du travail.

Impossibilité pour l'employeur de suivre les préconisations du médecin du travail

Lorsque les préconisations du médecin du travail sont difficiles à mettre en place, l'employeur peut, sans manifester pour autant un désaccord :

- lui exposer ses difficultés pour aménager le poste de travail du salarié;
- lui proposer de venir dans l'entreprise pour qu'il constate les contraintes liées aux aménagements demandés;
- solliciter de nouveau son avis⁴.

Le médecin du travail peut alors délivrer une attestation de suivi ou un avis d'aptitude, mais préconiser des aménagements plus adaptés aux contraintes de l'entreprise. Il peut aussi, lorsqu'il constate que l'état de santé du salarié est devenu incompatible avec le poste qu'il occupe, délivrer un avis d'inaptitude.

La cellule pluridisciplinaire, chargée de missions de prévention de la désinsertion professionnelle au sein des services de prévention et de santé au

travail (SPST) peut accompagner le travailleur et proposer, en lien avec le travailleur et l'employeur, les mesures individuelles d'aménagement, d'adaptation et de transformation du poste de travail⁵.

À noter : L'employeur peut saisir le conseil de prud'hommes d'une contestation portant sur les avis, propositions, conclusions écrites ou indications émis par le médecin du travail reposant sur des éléments de nature médicale⁶.

S'il ne se rapproche pas du médecin du travail afin de trouver une autre solution et qu'il n'exerce aucun recours contre l'avis du médecin du travail, l'employeur n'a pas d'autre choix que d'appliquer les préconisations émises.

Conséquences du non-respect par l'employeur des préconisations du médecin du travail

Le non-respect par l'employeur des préconisations du médecin du travail peut caractériser un manquement à l'obligation de sécurité à laquelle il est tenu. Dès lors qu'il ne prend pas en compte les aménagements proposés et qu'il n'agit pas à la suite de la réception de l'avis du médecin du travail, il manque à son obligation de sécurité et peut être condamné à verser des dommages et intérêts au salarié, en réparation du préjudice subi⁷.

L'employeur peut également être sanctionné lorsqu'il agit avec retard et ne sollicite pas d'éclaircissement de la part du médecin du travail sur les préconisations émises⁸.

Dans certaines circonstances, le non-respect des préconisations du médecin du travail peut justifier la prise d'acte de la rupture du contrat de travail par le salarié ou une demande de résiliation judiciaire aux torts de l'employeur.

La rupture du contrat de travail peut parfois produire les effets d'un licenciement sans cause réelle et sérieuse. Par exemple, le licenciement est sans cause réelle et sérieuse lorsque l'inaptitude à l'origine de ce licenciement a été causée par le comportement fautif de l'employeur qui n'a pas aménagé le poste de travail du salarié en dépit des préconisations formulées par le médecin du travail⁹. ●

1. Cour de cassation, chambre sociale, 19 décembre 2007, n° 06-46.134.

2. Cour de cassation, chambre sociale, 10 novembre 2009, n° 08-42.674.

3. Cour de cassation, chambre sociale, 27 septembre 2017, n° 15-28.605.

4. Conseil d'État, 20 novembre 2009, n° 315965.

5. Article L. 4622-8-1 du Code du travail.

6. Article L. 4624-7 du Code du travail.

7. Cour de cassation, chambre sociale, 2 mars 2016, n° 14-19.639.

8. Cour de cassation, chambre sociale, 7 janvier 2015, n° 13-15.630.

9. Cour de cassation, chambre sociale, 6 juillet 2017, n° 16-14.911.

Actualité juridique

L'EMPLOYEUR EST TENU PAR LES PRÉCONISATIONS DU MÉDECIN DU TRAVAIL

Cour de cassation, chambre sociale, 24 septembre 2025, pourvoi n° 24-15.895.

PÔLE
INFORMATION
JURIDIQUE
INRS,
département
Études, veille
et assistance
documentaires

Un salarié, manipulateur en électroradiologie médicale, a été victime d'un accident du travail en 2015. À la suite de cet accident, il a progressivement repris son activité professionnelle, notamment en mi-temps thérapeutique puis en temps partiel à 80 %. En 2020, à l'issue d'une visite de reprise organisée par le médecin du travail, celui-ci a déclaré le salarié apte à son poste, sous réserve d'une réduction du temps de travail à 50 % et d'un roulement d'activités adapté à son état de santé. Ces préconisations visaient à favoriser son maintien dans l'emploi, notamment en le dispensant des manutentions manuelles de charges lourdes.

L'employeur a contesté l'avis rendu par le médecin du travail devant le conseil de prud'hommes et, dans l'attente de la décision de celui-ci, a dispensé le salarié de son activité et réduit sa rémunération. De son côté, le salarié a sollicité la résiliation judiciaire de son contrat de travail aux torts de son employeur en invoquant une discrimination sur son état de santé.

La cour d'appel a considéré que l'employeur n'avait pas démontré l'impossibilité de proposer au salarié, pendant la durée de la procédure de contestation, un poste compatible avec les préconisations du médecin du travail (absence d'échanges préalables avec le salarié et le médecin du travail pour une solution d'attente). Elle a donc retenu que la dispense d'activité accompagnée de la diminution de la rémunération, instaurée dans l'attente de la décision de contestation de l'avis médical, constituait une mesure discriminatoire fondée sur l'état de santé du salarié.

En conséquence, la cour a prononcé la résiliation judiciaire du contrat de travail du salarié produisant les effets d'un licenciement nul.

L'employeur s'est pourvu en cassation, soutenant que la dispense d'activité était un moyen de garantir la sécurité du salarié, dans la mesure où il estimait être dans l'impossibilité de mettre en œuvre les préconisations médicales et dans l'attente que

le conseil de prud'hommes statue sur son recours contre l'avis d'aptitude avec réserve.

La Cour de cassation écarte cet argument en rappelant qu'en vertu des dispositions des articles L. 4624-6 et L. 4624-7 du Code du travail, l'employeur est tenu de prendre en considération les avis et propositions du médecin du travail, lesquels produisent effet immédiatement, même en cas de recours.

La Cour rejette donc le pourvoi de l'employeur et confirme la position de la cour d'appel, selon laquelle la dispense d'activité du salarié est, dans ce cas, un manquement grave qui rend impossible la poursuite du contrat de travail et que la rémunération étant un élément essentiel du contrat, il ne peut être modifié sans l'accord du salarié. Une telle mesure, directement liée à l'état de santé du salarié, revêt un caractère discriminatoire, justifiant la résiliation judiciaire du contrat. ●



© Gael Kerbaol / INRS / 2019

Focus normalisation

VENTILATION DES CABINES D'ENGINS : UNE NORME HORIZONTALE PLUTÔT QUE DES SOLUTIONS INDIVIDUELLES

GÜNTHER WEISE
Centre allemand du travail et de la technologie forestiers (KWF)

ANJA VOMBERG
Commission allemande pour la sécurité au travail et la normalisation (KAN)

KAN Brief
KOMMISSION ARBEITSSCHUTZ UND NORMUNG

Cet article est issu du bulletin d'information KAN-Brief n° 3/25 (consultable sur : www.kan.de/fr) de la *Kommission Arbeitsschutz und Normung (KAN)*. The English version of this article is accessible at www.kan.de/en

Les engins mobiles sont souvent utilisés dans des environnements où se trouvent des substances dangereuses ou des agents biologiques. Pour la protection des opérateurs, des exigences relatives à la conception et à la ventilation des cabines fermées ont été définies dans diverses normes relatives aux machines. Le niveau de protection n'est toutefois pas toujours le même, en fonction de l'engin. Du point de vue de la santé et de la sécurité au travail, il serait bon de créer une base uniforme.

VENTILATION REQUIREMENTS FOR MACHINE-OPERATOR CABINS: IN FAVOUR OF A HORIZONTAL STANDARD RATHER THAN INDIVIDUAL SOLUTIONS –

Mobile machinery is often used in environments contaminated with hazardous substances and biological agents. To protect operating personnel, a number of machinery standards set out requirements for the design and ventilation of enclosed operator cabins. However, the level of protection specified differs from machine to machine. OSH stakeholders take the view that a harmonised reference basis should be created.

De nombreuses normes relatives aux engins mobiles traitent aussi des cabines et des exigences en matière de ventilation auxquelles celles-ci doivent répondre pour la protection contre les agents biologiques et substances dangereuses. Les exigences de conception font souvent l'objet d'un article spécifique dans une norme de produit (consacrée par exemple aux chariots de maintenance, engins de terrassement ou engins forestiers). Certaines normes sont consacrées exclusivement à la ventilation d'engins mobiles spécifiques (p.ex. d'engins miniers ou de tracteurs). La normalisation à ce sujet s'effectue dans différents comités de normalisation, et il arrive souvent que les experts qui y participent ne soient pas connectés entre eux. Du point de vue de la prévention et dans le souci de la protection contre les agents biologiques et substances dangereuses, il serait donc judicieux d'analyser quelles exigences relatives à la ventilation des cabines pourraient être formulées de manière générale dans

une norme horizontale, applicable à tous les types d'engins, afin que tous les opérateurs bénéficient du même niveau de protection. Chaque comité de normalisation concerné pourrait alors renvoyer aux exigences de cette norme horizontale ou, si nécessaire, les adapter à l'engin mobile en question.

La KAN dresse un état des lieux

En 2023, la KAN a chargé la société DIN Software de dresser un état des lieux de toutes les normes dans lesquelles des cabines d'engins sont standardisées et dans lesquelles la ventilation – et donc la protection contre les substances dangereuses et agents biologiques – a un rôle à jouer. Les exigences concernant la climatisation ou l'ergonomie des cabines ne faisaient pas l'objet de l'analyse. Dans le cadre d'un projet de suivi, une équipe dirigée par le Dr Günther Weise du Centre allemand du travail et de la technologie forestiers (KWF) a analysé les textes complets des documents pertinents. Le but de cette démarche était

d'identifier les exigences de nature générale en matière de ventilation, et ce pour des utilisations prévues d'une part dans des environnements contaminés par des agents biologiques ou substances dangereuses, et d'autre part dans des environnements non contaminés. Les résultats devaient alors être compilés dans un document pouvant servir de base à l'élaboration d'un projet de norme horizontale (norme B).

Lors de l'examen des documents ainsi identifiés, les exigences pertinentes relatives à la ventilation ont été catégorisées afin de pouvoir repérer systématiquement celles qui pouvaient être généralisées. Parmi les normes examinées, les plus représentées étaient celles concernant les engins de construction, suivies par celles relatives à la technique agricole, à la technique de manutention, aux machines forestières, à la technique ferroviaire et aux engins miniers. Nombre de ces normes contiennent aussi des exigences explicites auxquelles doit répondre la ventilation des cabines des engins appelés à être utilisés dans des milieux contaminés.

Différencier les poussières et les substances dangereuses / agents biologiques

Pour l'évaluation des normes, une liste de mots-clés reflétant les aspects pertinents de la technique de ventilation a été dressée¹. Les occurrences et le contenu des références correspondantes dans les normes ont permis de déterminer plus en détail quelles exigences sont pertinentes pour une norme horizontale. Selon cette évaluation, ce sont les poussières (généralement d'origine minérale, mais éventuellement aussi d'origine biologique et notamment végétale, comme les poussières de bois) qui constituent les principaux risques rencontrés lors de l'utilisation d'engins mobiles. Leur action résulte de leurs propriétés physiques, et elles ne sont ni toxiques ni infectieuses².

Pour les cas de risque d'exposition à la poussière, les normes examinées exigent unanimement une cabine fermée. Celle-ci doit présenter une ouverture d'arrivée d'air équipée d'un filtre, voire d'un pré-filtre, ainsi qu'un élément de ventilation doté d'une ouverture d'évacuation d'air. Des filtres appropriés doivent être utilisés, par exemple conformes à la norme EN 1822-1 (Partie 1)³. Globalement, ce système doit agir de manière à créer une surpression dans la cabine. Lors de l'examen des normes, il a été possible d'en dégager des exigences portant non seulement sur les filtres, mais aussi sur la conception du système de circulation de l'air et sur l'étanchéité à la pression. Une telle protection de l'opérateur peut être considérée comme étant le niveau de protection de base pour les poussières. Un environnement de travail est considéré comme contaminé lorsque l'air est pollué par des substances dangereuses à effet toxique ou par des

agents biologiques ayant un effet infectieux ou sensibilisant. Dans ces cas, afin d'obtenir une protection efficace contre la contamination, il y a lieu de respecter des exigences plus strictes que le niveau de protection de base pour le système de ventilation de la cabine, prévoyant par exemple des atmosphères en surpression contrôlée, des systèmes d'air comprimé respirable, des composants de filtration adaptés. Une norme horizontale doit en outre fournir des indications sur les précautions à prendre en cas de phénomènes dangereux liés aux gaz et aux vapeurs (par exemple, des lits d'adsorbants adaptés aux polluants).

Une norme européenne ou internationale en ligne de mire

Le projet a débouché sur le premier brouillon d'un projet de norme intitulé « *Machines automotrices - Systèmes de ventilation pour cabines fermées - Exigences générales pour la protection contre les substances dangereuses et agents biologiques* ». Ce document propose des exigences de base communes pour les systèmes de ventilation des cabines fermées d'engins automoteurs et mobiles, de tracteurs et de chariots de manutention. Cette version préliminaire définit deux catégories de cabines, pour des environnements de travail différents : la première offre une protection de base contre l'exposition générale à la poussière. La deuxième assure une protection supplémentaire contre les substances dangereuses et agents biologiques. Avec les cabines de cette catégorie, il est également possible d'offrir une protection contre les gaz dangereux en adaptant le système de ventilation⁴. Un élément essentiel de ce document est le fait que ces exigences sont également applicables aux solutions de deuxième monte, sur lesquelles misent de nombreux fabricants et utilisateurs. La KAN va maintenant soumettre ce document au comité compétent du DIN, dans le but de le présenter comme proposition de norme au niveau européen, voire international. ●

1. Mots-clés les plus cités : prescriptions sur les filtres, poussière, environnement contaminé, ventilation en surpression, taux de renouvellement d'air, pression d'air, catégorie de cabine, contrôle des filtres, etc.

2. Remarque : En France, les travaux exposant aux poussières de bois inhalables figurent dans la liste réglementaire des travaux ou procédés exposant à des agents cancérigènes (arrêté du 26 octobre 2020 ; articles R. 4412-59 et suivants du Code du travail ; tableaux des maladies professionnelles n° 47 du Régime général et n° 36 du Régime agricole de la Sécurité sociale). Leur valeur limite d'exposition professionnelle (VLEP) sur 8 heures est de 1 mg/m³. Les poussières de bois sont classées par le Centre international de recherche sur le cancer (Circ) dans le groupe 1 (cancérigènes avérés).

3. Norme NF EN 1822-1 – Filtres à air à haute efficacité (EPA, HEPA et ULPA). Partie 1 : classification, essais de performance et marquage. Afnor, avril 2019.

4. Et (selon l'INRS) en ajoutant aux filtres à particules un lit de charbon actif pour les gaz.



Dossier

INCENDIE, EXPLOSION : DÉSAMORCER LES RISQUES

- ❶ Incendie et explosion : tous concernés
P.24
- ❷ Impact de la représentativité des échantillons sur l'évaluation des risques d'incendie et d'explosion de poussières
P. 28
- ❸ Méthodes de production d'hydrogène, risques associés et prévention
P. 38
- ❹ Prévention du risque incendie et explosion dans les solutions conteneurisées
P. 42
- ❺ Assurer une conception efficace des barrières de sécurité incendie et explosion
P. 48
- ❻ L'ingénierie de sécurité incendie : un outil au service de la prévention
P. 56

Les risques d'incendie et d'explosion sont présents dans une grande diversité d'entreprises. Ce dossier rappelle les notions et principes de base pour mettre en œuvre une démarche de prévention adaptée à chaque situation rencontrée. Après un premier article rappelant les notions et principes de prévention communs, un deuxième article revient sur l'importance de la connaissance de la dangerosité des produits. Dans les troisième et quatrième articles, les risques émergents liés aux nouveaux vecteurs énergétiques (hydrogène, batteries lithium-ion) sont abordés. Le cinquième article présente une démarche méthodologique robuste de prévention des risques, issue de l'industrie et du domaine du pétrole et du gaz, en l'appliquant aux nouveaux vecteurs énergétiques. Face aux limites de l'approche prescriptive actuelle concernant les nouveaux enjeux liés aux risques émergents et à leur prévention, le sixième article présente l'approche dite d'« ingénierie de sécurité incendie », en illustrant son apport pour la sécurité des travailleurs. Les outils correspondants se sont en effet largement perfectionnés au cours des vingt dernières années et ils fournissent aux préventeurs des éléments d'évaluation des risques précis en fonction de nombreux paramètres.

FIRE, EXPLOSION: DEFUSING THE RISKS – The risks of fire and explosion are present in a wide diversity of companies. This dossier sets out the basic concepts and principles to be considered when implementing a prevention approach adapted to specific situations. After a first article reminding readers of transversal concepts and principles of prevention, the second article reviews the importance of being aware of the dangers associated with specific products. The third and fourth articles cover emerging risks linked to new energy vectors (hydrogen, lithium-ion batteries). The fifth article presents a robust methodological approach to risk prevention, developed in industrial settings and in the gas and hydrocarbon fields, and applies it to new energy vectors. Given the limits of the current prescriptive approach when faced with emerging risks and their prevention, the sixth article presents a “fire safety engineering” approach, and illustrates its benefits for worker safety. The corresponding tools have been extensively honed over the last twenty years and they provide health and safety prevention professionals with precise elements to assess risks based on numerous parameters.

INCENDIE ET EXPLOSION : TOUS CONCERNÉS

Prenant en compte la grande diversité des entreprises qui présentent des risques d'incendie ou d'explosion, cet article rappelle les notions et principes de base pour mettre en œuvre une démarche de prévention à la mesure de chaque situation rencontrée. L'application des principes, méthodes et outils détaillés dans ce dossier permet d'adapter la prévention des risques à l'évolution rapide des nouvelles technologies.

BENOÎT SALLÉ,
PIERRE-NICOLAS MAUGER
INRS,
département
Expertise
et conseil
technique

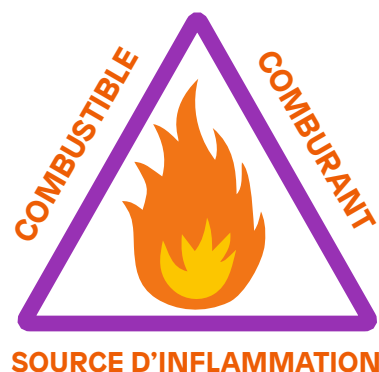
Les risques d'incendie et d'explosion sont des sujets de préoccupation permanente pour de nombreuses entreprises. En effet, les incendies et les explosions sont à l'origine de blessures graves, voire de décès, et de dégâts matériels considérables. Chacun de ces risques fait l'objet d'une démarche de prévention spécifique dont l'objectif prioritaire est d'agir avant que le sinistre ne survienne. Il n'en reste pas moins que, compte tenu des conséquences de ces événements, il est aussi nécessaire de combiner des dispositions techniques et organisationnelles, avec pour objectif de limiter l'étendue d'un éventuel sinistre. L'incendie et l'explosion d'atmosphère explosive (ATEX) se définissent comme des réactions de combustion ; ainsi, l'incendie peut mener à une explosion et inversement. Les produits combustibles qui génèrent ces phénomènes dangereux sont extrêmement courants en entreprise ; il est donc nécessaire que toutes les situations de travail les mettant en œuvre fassent l'objet d'une analyse des risques pour mettre en place des mesures de prévention et des moyens de protection adaptés.

Afin de maîtriser les démarches de prévention, il est essentiel de comprendre ces phénomènes dangereux et de connaître les conditions de leur survenue. Pour l'incendie, la représentation la plus commune est le « triangle du feu » (Cf. Encadré 1). En effet, la réaction de combustion doit mettre en œuvre trois éléments, schématisés par le triangle du feu, pour pouvoir être initiée. Cette réaction de combustion va engendrer un important dégagement de chaleur, ainsi que des fumées composées de particules et de produits de dégradation majoritairement inflammables et toxiques (oxydes de carbone, acides, hydrocarbures aromatiques polycycliques...). En l'absence de dispositions techniques et organisationnelles permettant de limiter sa propagation, l'incendie continue jusqu'à ce qu'il ne reste plus de combustible ou de comburant. Pour que la réaction de combustion puisse produire une explosion, caractérisée par des effets de surpression en plus des effets thermiques, il est nécessaire d'ajouter trois conditions au triangle du feu. On parle alors de l'« hexagone de l'explosion » (Cf. Encadré 2).

ENCADRÉ 1 LE TRIANGLE DU FEU

Pour qu'une combustion susceptible de produire un incendie soit possible, il faut trois conditions simultanées [1] :

- un combustible, c'est-à-dire une matière capable de brûler (matériau de construction, bois, essence, papier, carton, chiffon...);
- un comburant, qui, en se combinant avec le combustible, permet la combustion (oxygène, air...);
- une source d'inflammation, qui va initier la réaction de combustion (étincelle, flamme nue, surface chaude...).



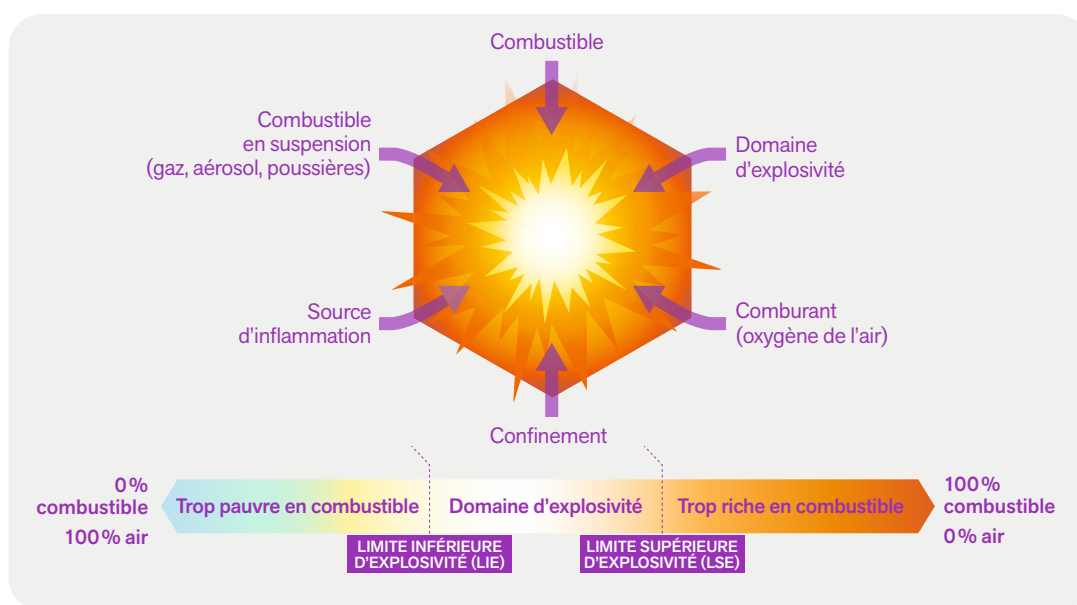
ENCADRÉ 2

L'HEXAGONE DE L'EXPLOSION

Pour qu'une explosion se produise, il faut six conditions simultanées [2].

Le confinement n'est pas une condition indispensable, mais représente un facteur aggravant du phénomène d'explosion et des risques associés.

**Hexagone de l'explosion :
6 conditions à remplir**



L'intérêt de ces représentations, au-delà de la compréhension des phénomènes dangereux mis en jeu, est que toute action portant sur au moins un des sommets aura pour incidence la diminution voire la suppression du risque.

Démarche de prévention : approches stabilisées, offre d'information de l'INRS

Face à l'enjeu, l'INRS a développé une offre d'information complète avec des produits relatifs aux différentes étapes de la démarche de prévention ou à des domaines ou thèmes spécifiques. Cette offre comprend notamment :

- des outils de sensibilisation: documents synthétiques [1-2], dossiers Web sur l'incendie et l'explosion [3], vidéos en format court utilisables également pour des formations, affiches et autocollants [4];
- des outils méthodologiques: évaluation du risque d'incendie [5] et du risque d'explosion [6], démarche de prévention (notamment permis de feu [7], consignes de sécurité [8] et consignation/déconsignation des installations [9]);
- des publications techniques sur la prise en

compte du risque: incendie [10], explosion de gaz/vapeurs [11], explosion de poussières [12];

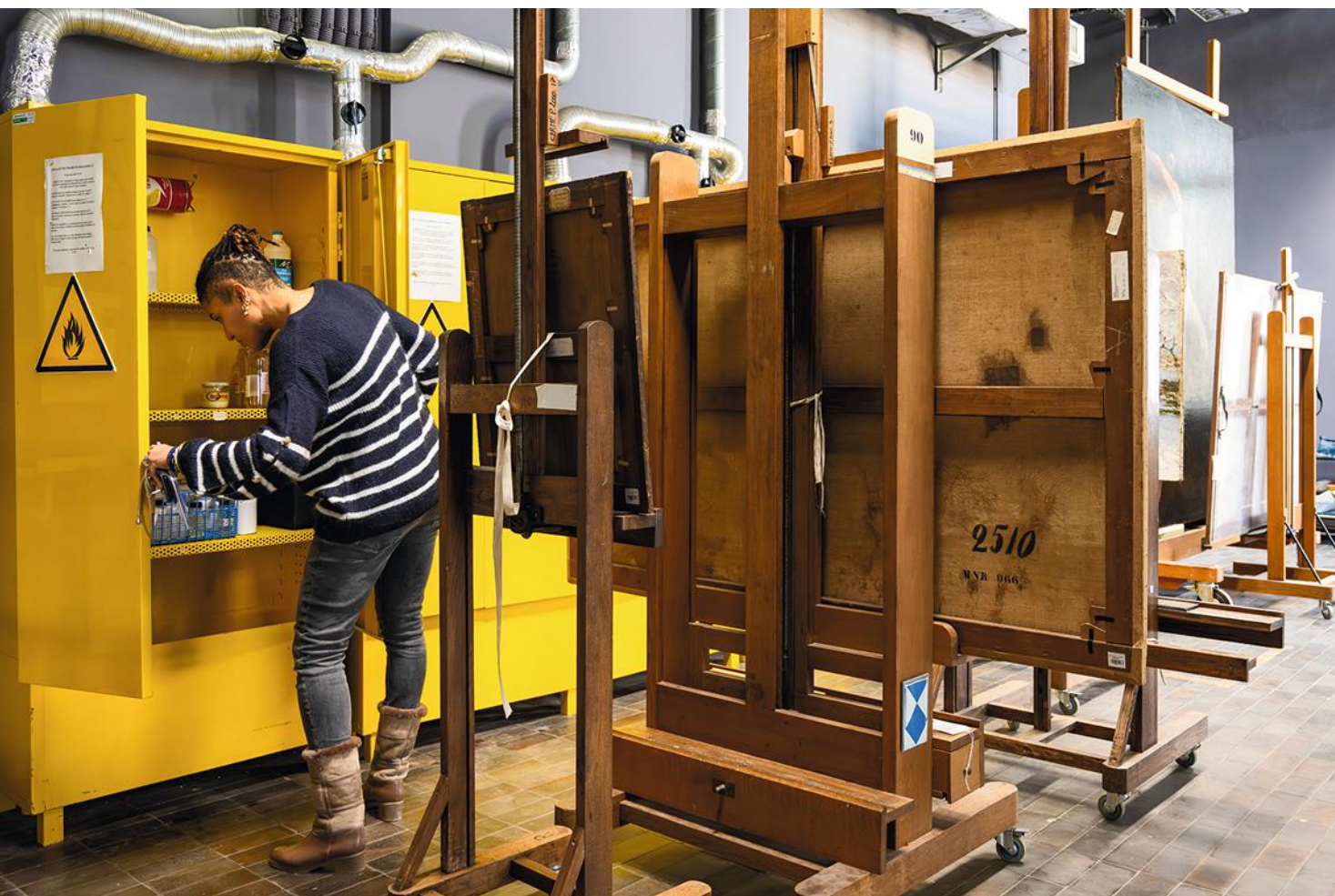
- des publications consacrées à certaines situations de travail ou certains domaines d'activité: charges des accumulateurs plomb-acide [13], méthanisation [14], véhicules industriels équipés au gaz naturel [15], nettoyage des cuves de produits pétroliers en station de distribution [16], choix et utilisation des extincteurs [17], industrie du bois [18];
- des rediffusions de journées techniques permettant de partager des bonnes pratiques en termes de prévention [19,20].

Malgré l'importance de ce fonds documentaire, il ne pourra jamais être exhaustif et aborder l'ensemble des situations de travail et des mesures de prévention et de protection adaptées à mettre en place, notamment pour la prévention des risques émergents.

Évolutions technologiques : revenir à une démarche complète de prévention

Dans ce dossier, le choix a été fait de privilégier des articles mettant en lumière une démarche méthodologique globale qui n'est souvent pas détaillée





© Patrick Delapierre pour l'INRS / 2025

pour des équipements ou des procédés existants. En effet, les évolutions constantes de la technique, des produits utilisés et des besoins de solutions industrielles, additionnées à la pression socio-économique d'autre part, montrent qu'il est primordial de ne pas oublier que la prévention des risques est une démarche structurée et méthodique amenant à la mise en place des mesures de prévention et de protection adaptées au risque. Les développements de nouveaux procédés ou l'émergence de nouvelles situations de travail nécessitent une appropriation de la culture de prévention des risques par les acteurs concernés. Par ailleurs, les concepts de sécurité préexistants pouvant atteindre leurs limites, une analyse de risque spécifique est essentielle afin de mettre en place des moyens de prévention et de protection adaptés. Tout cela doit être intégré dans une vision globale, depuis la conception des équipements et des situations de travail jusqu'à l'entretien et la maintenance de ces équipements.

Bien connaître les produits pour mieux évaluer les risques

Le deuxième article (Cf. pp. 28-37) correspond au premier thème essentiel de la démarche de préven-

tion : la connaissance de la dangerosité des produits. Pour un gaz ou une vapeur combustible, les données sont largement disponibles. Il existe par ailleurs des approches permettant d'estimer les données relatives à l'inflammabilité/explosivité des substances en mélange. Cependant, cette connaissance acquise pour les gaz/vapeurs n'est pas transposable aux poudres et poussières utilisées ou produites par les procédés. Cet article aborde donc les facteurs qui influencent les caractéristiques d'explosivité des matériaux solides, tout en définissant des éléments indispensables pour une bonne analyse de risques tout au long du procédé.

Dans la suite du dossier, les risques émergents liés aux nouveaux vecteurs énergétiques (hydrogène, batteries lithium-ion) sont abordés (Cf. pp. 38-41 et pp. 42-47). Ils éclairent le lecteur sur les spécificités de ces produits.

L'hydrogène, outre ses propriétés de combustion singulières (très faible énergie d'inflammation, vaste domaine d'inflammabilité, vitesse élevée de propagation du front de flamme, cinétique de montée en pression rapide), doit également être appréhendé vis-à-vis de sa compatibilité avec les matériaux (fragilisation des métaux, perméabilité entraînant

des fuites) et de sa pression de stockage très élevée dans les applications visées (pouvant dépasser plusieurs centaines de bars).

Pour les batteries lithium-ion, leur défaillance (emballement thermique notamment) peut entraîner des cinétiques d'incendie particulièrement violentes et difficiles à maîtriser, voire une explosion. Ces éléments remettent en question les stratégies de sécurité habituellement utilisées pour prévenir les risques d'incendie/explosion.

Intégrer la sécurité des travailleurs dans une approche globale

Le cinquième article (Cf. pp. 48-55) présente une démarche méthodologique robuste de « maîtrise des risques », issue de l'industrie et du domaine du pétrole et du gaz, appliquée aux nouveaux vecteurs énergétiques. Cette méthode décloisonne les différentes approches de la prévention des risques et replace la santé et la sécurité des salariés au cœur d'une approche globale. Elle apporte aux préventeurs une connaissance des autres outils et visions existantes des différentes parties prenantes (fabricants, intégrateurs, installateurs, législateur, assureurs, services de secours...), permettant d'enrichir

leur réflexion et leur compréhension des risques dans les applications émergentes. De plus, les différentes barrières de sécurité ont une influence conjointe et globale sur la prévention du risque. Leur connaissance et leur prise en compte sont donc également importantes pour la sécurité des travailleurs. Par ailleurs, face aux limitations de l'approche prescriptive actuelle concernant les nouveaux enjeux liés aux risques émergents et à leur prévention, le sixième article (cf. pp. 56-60) présente l'approche dite d'« ingénierie de sécurité incendie », en illustrant son apport pour la sécurité des travailleurs. Ces outils, appliqués à l'incendie et à l'explosion, se sont en effet largement perfectionnés au cours des vingt dernières années. Portés par un contexte réglementaire favorable, ils fournissent aux préventeurs des éléments d'évaluation des risques précis en fonction de nombreux paramètres.

Conclusion

Compte tenu de l'évolution rapide des technologies, la mise en œuvre des principes, méthodes et outils détaillés dans le dossier est nécessaire pour une prévention adaptée des risques associés à ces nouvelles applications. ●

BIBLIOGRAPHIE

- [1] INRS – *L'incendie sur le lieu de travail*. ED 6336. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%206336>
- [2] INRS – *L'explosion d'Atex sur le lieu de travail*. ED 6337. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%206337>
- [3] INRS – *Incendie et explosion sur le lieu de travail. S'informer pour prévenir*. ED 4702. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%204702>
- [4] INRS – *Incendie et explosion : des combustions ravageuses*. Page portail / Dossiers Web. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/risques/incendie-explosion/introduction.html>
- [5] INRS – *Évaluation du risque incendie dans l'entreprise. Guide méthodologique*. ED 970. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%20970>
- [6] 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>
- [7] INRS – *Le permis de feu. Démarche et document support*. ED 6030. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%206030>
- [8] INRS – *Consignes de sécurité incendie. Conception et plans associés*. ED 6230. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%206230>
- [9] INRS – *Consignations et déconsignations*. ED 6109. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%206109>
- [10] INRS – *Incendie et lieu de travail. Prévention et organisation dans l'entreprise*. ED 990. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%20990>
- [11] INRS – *Les mélanges explosifs. Gaz et vapeurs*. ED 911. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%20911>
- [12] INRS – *Les mélanges explosifs. Poussières combustibles*. ED 944. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%20944>
- [13] INRS – *Charge des batteries d'accumulateurs au plomb. Prévention du risque explosion*. ED 6120. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%206120>
- [14] INRS – *Méthanisation des déchets issus de l'élevage, de l'agriculture et de l'agroalimentaire. Risques et prescriptions de sécurité*. ED 6153. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%206153>
- [15] INRS – *Véhicules industriels équipés au gaz naturel*. ED 6090. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%206090>
- [16] INRS – *Stations-services et autres stations de distribution de produits pétroliers. Prévenir les risques lors des opérations de maintenance*. ED 6256. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%206256>
- [17] INRS – *Les extincteurs d'incendie portatifs, fixes et mobiles*. ED 6054. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%206054>
- [18] INRS – *Incendie et explosion dans l'industrie du bois*. ED 6021. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%206021>
- [19] LABORDE L. – Prévention du risque incendie : enjeux et principes. Compte rendu de la journée technique organisée par l'INRS le 11 décembre 2018. *Hygiène & sécurité du travail*, 2019, CC 27, pp. 90-94. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=CC+27>
- [20] INRS – *Journée technique du 17 novembre 2020 – Atmosphères explosives en entreprise : quels risques, quelle prévention ?* Présentation et rediffusions accessibles sur : <https://www.inrs.fr/footer/actes-evenements/journee-technique-atex.html>

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, supprimeurs, 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.

MÉTHODES DE PRODUCTION D'HYDROGÈNE, RISQUES ASSOCIÉS ET PRÉVENTION

Cet article revient en détail sur les technologies de production d'hydrogène, sur les risques d'incendie et d'explosion qui y sont associés et sur les démarches et moyens de prévention mis en place pour les combattre à la source.

CYRIL GEHL
société Fike

La production mondiale d'hydrogène a presque doublé ces dernières années, passant de 55 Mt en 2005 à 97 Mt en 2024 ; cependant, seul 1 % de cette production (hydrogène bleu et vert) est considéré « à faibles émissions » de gaz à effet de serre¹.

Afin de mieux comprendre les différents types de production d'hydrogène et leurs divers niveaux d'émissions, ceux-ci sont généralement regroupés en catégories de couleur, chacune étant définie par la source d'énergie utilisée, la technologie de production et l'empreinte carbone (Cf. Figure 1). Par exemple, les couleurs les plus foncées, noir et marron, représentent les productions d'hydrogène les plus polluantes, tandis que les couleurs les plus claires, bleu et vert, représentent les moins émissives.

Chacune de ces méthodes de production présente des risques spécifiques, notamment ceux liés à la pression, aux incendies et aux explosions. L'objectif de cet article est d'identifier ces risques et de mettre en évidence les meilleures pratiques pour les prévenir.

Risques liés à la production d'hydrogène noir et marron et moyens de prévention et de protection

- Source de combustible : charbons noir et brun (lignite).
- Pourcentage estimé de la production totale d'hydrogène : 30 %.
- Technologie : gazéification – le charbon réagit avec la vapeur d'eau et l'oxygène à haute température.

Plusieurs étapes du processus de gazéification peuvent présenter des risques d'explosion.

Étape 1 : broyage du charbon

Le broyage du charbon (Cf. Figure 2) provoque la mise en suspension de poussières combus-

tibles dans le broyeur et forme une atmosphère explosive (Atex). De plus, la présence de sources d'inflammation dans le broyeur ne peut être totalement exclue par des mesures techniques ou organisationnelles.

Les mesures suivantes permettent de prévenir les risques pour les travailleurs et de protéger les installations :

- Caractérisation de la poussière à l'aide de tests en laboratoire (Cf. pp. 28-37). En effet, les propriétés d'inflammabilité et d'explosivité peuvent varier en fonction du type de charbon, de la taille des particules ou de la teneur en humidité. Cette étape est particulièrement essentielle afin

PRODUCTION D'HYDROGÈNE

NOIR

Gazéification du charbon

MARRON

Gazéification du lignite (charbon brun)

GRIS

Reformage du gaz naturel

NOIR

Reformage du gaz naturel avec CSC*

VERTE

Électrolyse

*Captage et stockage du carbone

↑ FIGURE 1 Exemple de classification des modes de production de l'hydrogène.

de définir correctement les mesures de prévention et les équipements de protection.

- Évaluation des risques tenant compte des spécificités du processus. Elle permet d'identifier les zones à risques et de définir les mesures de prévention des explosions, telles que les actions sur le contrôle des émissions de poussières, les sources d'inflammation, les paramètres de contrôle, la maintenance et l'entretien des équipements, le nettoyage des dépôts.
- Définition de mesures de protection pour le broyeur. Elles consistent à prévoir des dispositifs devant remplir deux fonctions : limiter l'accumulation de pression dans l'enceinte et empêcher l'explosion de se propager aux équipements connexes. Les systèmes de suppression des explosions (au moyen d'agents extincteurs) sont généralement préférés aux événements d'explosion « passifs » en raison des niveaux élevés de vibrations associés aux broyeurs à charbon. Ces systèmes fonctionnent comme suit : quelques centaines de millisecondes après avoir détecté une augmentation anormale de la pression liée à l'inflammation de l'Atex, un agent extincteur est injecté dans l'enceinte. Cela arrête la réaction de combustion et limite par conséquent l'augmentation de pression. L'explosion doit également être contenue dans le broyeur, afin d'éviter sa propagation aux autres équipements, tels que les cyclones ou les dépoussiéreurs. Les dispositifs d'isolation chimique recommandés sont installés sur l'entrée d'air chaud, l'entrée des briquettes de charbon et la sortie des poussières de charbon. Ils fonctionnent de manière similaire aux systèmes de suppression des explosions en créant une barrière inerte que les flammes ne peuvent pas franchir.

Étape 2 : Gazéification

Après broyage, le charbon est soumis à un processus de « gazéification » afin de créer un gaz de synthèse contenant de l'hydrogène. Bien que plusieurs étapes du processus de gazéification soient considérées comme dangereuses, cette section se concentre uniquement sur l'oxydation, qui est considérée comme la phase la plus critique. De même, la fragilisation des matériaux par l'hydrogène doit être prise en compte sur l'ensemble de l'installation (phénomène détaillé ci-après). Après séchage et pyrolyse du charbon, une quantité contrôlée d'oxygène est injectée. Le charbon subit une combustion partielle, générant de la chaleur, des oxydes de carbone et de l'eau. L'injection d'oxygène provoque la formation d'une Atex. Outre les systèmes de protection contre les explosions, des mesures techniques réduisent le risque de combustion et se concentrent principalement sur le contrôle des processus, telles que :



© Flickr

- surveiller les températures afin de maintenir le réacteur dans les limites de fonctionnement spécifiées ;
- ventiler afin de réduire la concentration en gaz inflammables ;
- inerte le réacteur au démarrage et à l'arrêt ;
- arrêter le processus dès la détection d'une anomalie, telle qu'une température de surface élevée ou une étincelle.

Le choix et l'ampleur de ces mesures doivent être déterminés par une évaluation des risques liée au processus.

↑ **FIGURE 2**
Broyeur à charbon.

Risques liés à la production d'hydrogène gris et bleu et moyens de prévention et de protection

- Source de combustible : gaz naturel.
- Pourcentage estimé de la production totale d'hydrogène : 60 % (gris), 2 % à 3 % (bleu).
- Technologie : reformage du méthane à la vapeur (en anglais SMR : *Steam methane refining*) ; une chaleur intense est utilisée pour transformer le méthane en hydrogène.

Le vaporeformage du méthane (SMR) requiert un four de reformage à la vapeur, dans lequel le gaz naturel et la vapeur passent à travers des dizaines de tubes remplis de catalyseurs à des températures pouvant atteindre 1 100 °C pour produire de l'hydrogène, appelé hydrogène gris. Une forme encore plus éco-efficace de ce processus permet la production d'hydrogène bleu. Elle utilise, une fois l'hydrogène produit, une technologie de capture et de stockage du carbone (en anglais CSC : *Carbon storage and capture*) pour réutiliser le CO₂ provenant du vaporeformage dans un autre processus





FIGURE 3 →
Disque de rupture
en amont
d'une PRV.

avec la vapeur d'eau et produisant de nouveau de l'hydrogène et du CO₂.

Les tubes catalyseurs et les collecteurs fonctionnent sous une pression généralement comprise entre 20 bar et 40 bar, et exigent donc un dispositif de décompression qui permet de limiter l'accumulation excessive de pression dans le système et l'empêche d'éclater. En raison du nombre important de tubes et de leur diamètre souvent réduit, des soupapes de décompression (en anglais PRV : *Pressure reducing valve*) sont installées au niveau du collecteur (en sortie) ou du manifold (en entrée) afin de couvrir l'ensemble du faisceau de tubes. Des disques de rupture (Cf. Figure 3) peuvent également être utilisés en amont des PRV pour les raisons suivantes :

- contrôle des émissions dans l'environnement de travail : des pressions légèrement supérieures à la normale peuvent entraîner des fuites indésirables au niveau de la soupape. Un disque de rupture en amont assure une étanchéité parfaite tant qu'il n'y a pas de nécessité de libérer une surpression dangereuse pour l'installation ;
- optimisation des coûts et protection des équipements de sécurité : le processus de reformage du méthane à la vapeur peut nécessiter l'installation de PRV fabriquées avec des matériaux coûteux, tels que des aciers fortement alliés, afin de les

protéger contre la corrosion et la fragilisation par l'hydrogène. Un disque de rupture en amont isole la vanne du fluide, protégeant ainsi les PRV coûteuses ou permettant l'utilisation de matériaux plus courants dans leur fabrication ;

- vérifications et contrôles : les vannes doivent être régulièrement démontées et testées afin de s'assurer qu'elles fonctionnent correctement et que les codes et les normes sont respectés, ce qui entraîne des temps d'arrêt indésirables. Certains types de disques de rupture permettent de réaliser des tests en cours de fonctionnement en pressurant la cavité entre les deux dispositifs.

La fragilisation par l'hydrogène doit également être prise en compte, car elle peut avoir un impact considérable sur les composants critiques. La fragilisation par l'hydrogène rend les métaux cassants en raison de l'introduction et de la diffusion d'hydrogène dans le matériau. Ce phénomène entraîne une réduction de la ductilité et une diminution de la capacité de charge en dessous de la résistance à la rupture ou de la limite d'élasticité prévue des matériaux qui y sont sensibles.

Des fissures peuvent alors apparaître sur un objet fragilisé sous l'effet de contraintes résiduelles, de service ou générées par des opérations de fabrication telles que le formage et le soudage.

Ces conditions peuvent entraîner des dommages importants et, à terme, la défaillance de composants critiques du processus. Il est donc essentiel d'éviter la fragilisation par l'hydrogène.

Les disques de rupture en acier inoxydable, tels que les nuances 304 et 316, ou en d'autres matériaux moins sensibles à la fragilisation par l'hydrogène, peuvent prolonger la durée de vie des PRV composées d'éléments soumis à des contraintes élevées, tels que les ressorts, les disques, les tiges et les sièges. En résumé, moins il y a de fluide qui circule dans une PRV, mieux c'est, et les disques de rupture constituent souvent une solution fiable et rentable pour cette stratégie d'isolation.

Le risque Atex est également très présent dans le processus de reformage à la vapeur en raison de la présence de l'hydrogène et de gaz inflammables pour alimenter les brûleurs des grands réchauffeurs.

Une atmosphère explosive peut se former notamment en cas de fuite de gaz, d'extinction de la flamme du brûleur ou de défaillance des tubes catalytiques (fragilisation par l'hydrogène, rupture pneumatique, etc.).

Il est ainsi pertinent de pouvoir détecter rapidement les diverses défaillances afin de mettre en œuvre les actions adaptées. Par exemple :

- détection de la présence de flammes du brûleur (détecteur UV/IR...) ;
- détection d'une fuite d'hydrogène gazeux (détecteur de gaz, détecteur acoustique...).

Risques liés à la production d'hydrogène vert et moyens de prévention et de protection

- Source d'énergie : électricité à partir d'énergies renouvelables (solaire, éolienne et hydraulique).
- Pourcentage estimé de la production totale d'hydrogène : 3 %.
- Technologie : électrolyse, utilisant l'électricité pour décomposer l'eau en oxygène et en hydrogène.

Les risques liés à la production d'hydrogène vert doivent d'abord être analysés au niveau de la source d'énergie.

Les installations de production d'électricité à partir d'énergies renouvelables peuvent présenter des risques d'incendie inhérents qui doivent être analysés en fonction des spécificités de ces technologies. Ces aspects ne sont pas détaillés dans cet article, qui se concentre sur le stockage de l'énergie électrique afin d'assurer la stabilité du réseau et la disponibilité de l'énergie électrique, ainsi que sur son utilisation pour produire de l'hydrogène par électrolyse de l'eau.

Les énergies renouvelables, en particulier celles provenant de sources non contrôlables telles que le solaire et l'éolien, sont souvent captées dans des batteries lithium-ion intégrées dans une construction mobile de type « conteneur maritime » appelée BESS (*Battery energy storage system* – poste stationnaire de stockage de l'énergie). Les batteries lithium-ion défectueuses peuvent subir un phénomène appelé « emballement thermique », qui est une réaction chimique engendrant une augmentation rapide de la température d'une cellule et l'émission de gaz toxiques et inflammables. Ce phénomène se propage rapidement aux cellules adjacentes (Cf. pp. 42-47).

Les incendies de batteries sont particulièrement difficiles à contrôler et à éteindre, car il est nécessaire de refroidir les cellules et d'arrêter la propagation de l'emballement thermique au cœur de la batterie. À l'heure actuelle, les systèmes traditionnels d'extinction d'incendie, basés sur une action externe avec de l'eau ou des agents chimiques, sont inefficaces contre les incendies dus à un emballement thermique et peuvent entraîner une réinflammation sous forme explosive. Des systèmes d'extinction innovants, basés sur un refroidissement interne et la gestion thermique des cellules sont en cours de développement.

La société Fike a notamment développé « Fike Blue », qui immerge le module de batterie et les cellules affectées et possède une capacité thermique suffisante pour absorber la chaleur et refroidir l'environnement, stoppant ainsi la propagation du phénomène d'emballement. Ce système empêche aussi la réinflammation des fumées émises.

Ce type de système doit être intégré dans une stratégie globale de gestion des risques, qui implique la

prévention du phénomène (qualité des batteries et des assemblages, utilisation dans les limites opérationnelles recommandées par le fabricant, maintenance des équipements, etc.), la formation du personnel de maintenance, la formalisation des procédures d'intervention, la détection des défauts (gaz, incendie, etc.), la gestion des gaz émis lors d'un emballement thermique (ventilation) et du risque d'inflammation différée (explosion).

Pour la production d'hydrogène, une fois l'énergie renouvelable captée en toute sécurité, elle peut être utilisée dans le processus d'électrolyse afin de décomposer l'eau en hydrogène et en oxygène. Les principaux risques liés à l'électrolyse concernent les émissions d'hydrogène et d'oxygène pendant le fonctionnement normal, les fuites accidentelles d'hydrogène et les mélanges accidentels d'oxygène et d'hydrogène en cas de défaillance de la membrane de l'électrolyseur.

Ces installations présentent également des risques liés à la corrosivité de l'électrolyte (électrolyse alcaline) et aux équipements sous pression. La sécurité du système d'électrolyse doit être considérée dès la phase de conception :

- prise en compte des caractéristiques spécifiques de l'hydrogène, notamment concernant la compatibilité des matériaux et le choix des composants;
- installation de soupapes de sécurité ou de disques de rupture;
- possibilité de sécuriser le système en cas de détection d'une fuite.

Les mesures visant à prévenir le risque d'explosion dans ces installations comprennent :

- la réalisation d'une étude Atex et la mise en œuvre des mesures qui en découlent (ventilation, protection contre les explosions, équipements électriques et non électriques adaptés, etc.);
- le contrôle régulier de l'étanchéité de la membrane;
- la définition de protocoles d'intervention sur les équipements (mise en sécurité, inertage, etc.) ;
- la formation du personnel d'exploitation et de maintenance.

Conclusion

Les différentes formes de production d'hydrogène nécessitent des processus complexes, chacun présentant des risques d'incendie-explosion qui doivent être analysés et pris en compte. Il est toujours recommandé de faire appel à un expert et d'appliquer les règles de l'art existantes, que ce soit pour la conception d'une nouvelle usine de production d'hydrogène ou pour l'analyse de la sécurité de fonctionnement, l'évaluation des risques et la mise en place des systèmes de sécurité et de protection. ●

1. Source : <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2024/hydrogen-production>

PRÉVENTION DU RISQUE INCENDIE ET EXPLOSION DANS LES SOLUTIONS CONTENEURISÉES

Parmi les différents vecteurs énergétiques utilisés pour accompagner la transition énergétique, l'hydrogène et les batteries lithium-ion ont pour point commun le déploiement sous la forme de solutions conteneurisées.

Cet article revient en détail sur les filières et les technologies de solutions conteneurisées, sur les risques d'incendie et d'explosion qui y sont associés, et sur les moyens de prévention permettant d'y faire face.

JÉRÔME
DAUBECH,
THIERRY
DELBAERE,
EMMANUEL
LEPRETTE,
MARIE-
ASTRID
SOENEN,
BENJAMIN
TRUCHOT,
BENNO
WEINBERGER
Ineris

L'avènement des solutions conteneurisées

Parmi les différents vecteurs énergétiques utilisés pour accompagner la transition énergétique, l'hydrogène et les batteries lithium-ion ont pour point commun le déploiement sous la forme de solutions conteneurisées.

Ce déploiement de systèmes énergétiques en conteneur permet une production et un stockage décentralisés, modulaires et transportables, utilisés dans des contextes industriels, portuaires, aéroportuaires, ou pour des installations temporaires ou mobiles.

Les conteneurs hydrogène sont des systèmes modulaires qui intègrent un ou des électrolyseurs et parfois une pile à combustible et des réservoirs d'hydrogène, ou encore des compresseurs d'hydrogène. La puissance énergétique de ces conteneurs peut atteindre plusieurs mégawatts, les pressions dans les réservoirs peuvent atteindre jusqu'à 1 200 bar.

Les conteneurs de batteries intègrent des batteries, des onduleurs et une gestion thermique. Ils sont conçus comme des systèmes pouvant être facilement mis en œuvre (type « *plug & play* ») et déployés en configuration associée (multi-conteneurs).

Aussi, parmi les bonnes pratiques pour sécuriser ces conteneurs vis-à-vis des risques associés aux systèmes énergétiques qui y sont installés, il est nécessaire de :

- concevoir la ventilation mécanique et naturelle de façon à éviter les zones mortes et favoriser l'extraction des gaz inflammables ou toxiques ;
- déployer des systèmes de détection précoce des fuites ou anomalies ;

- intégrer des barrières de sécurité (systèmes de refroidissement, capteurs de température, événements d'explosion..).

Cet article présente la synthèse des travaux de l'Ineris pour évaluer et « maîtriser les risques » associés à ces solutions conteneurisées.

Retours d'expériences

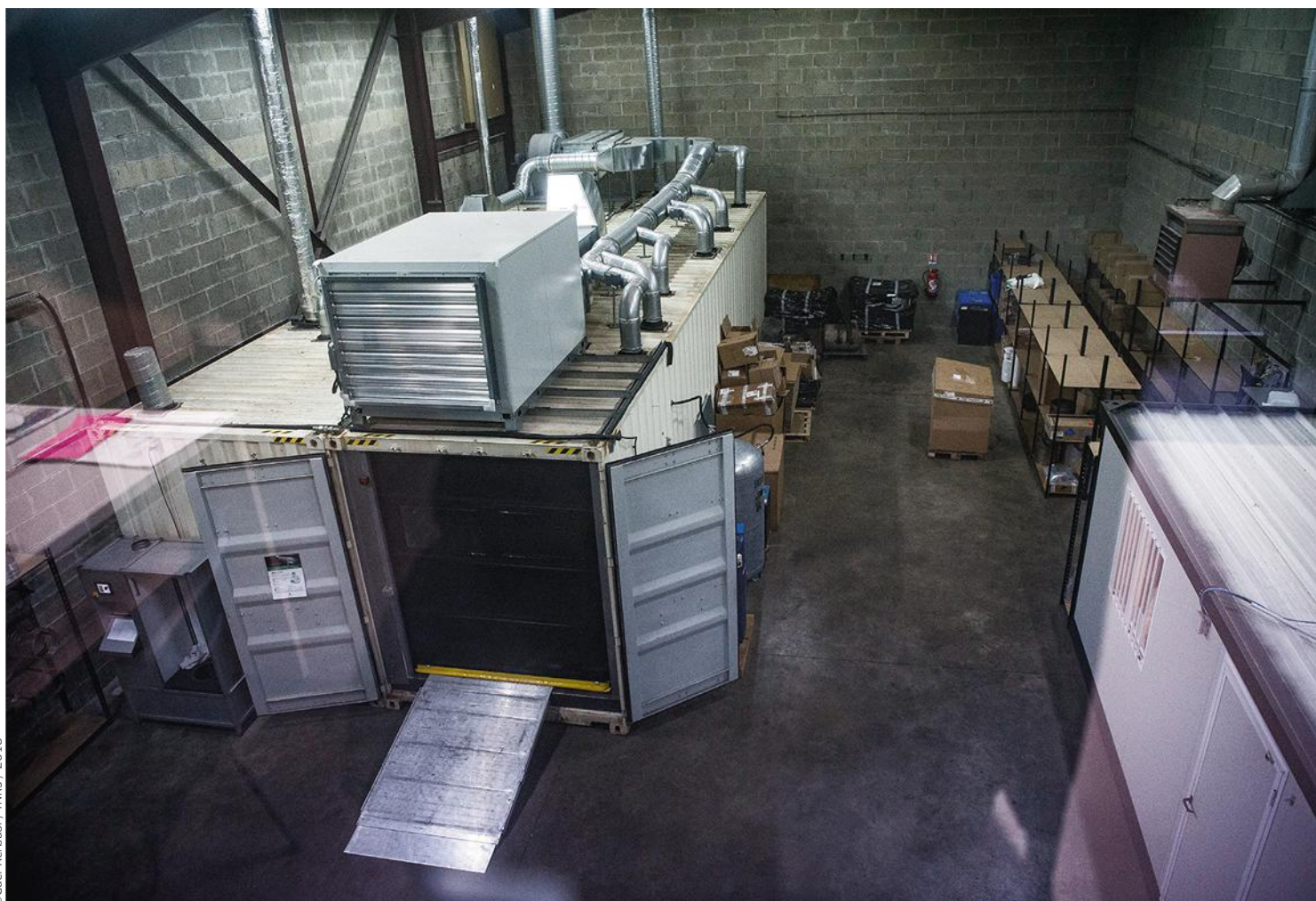
Les installations de production et de stockage d'énergie sous forme de conteneurs peuvent présenter un risque d'incendie ou d'explosion, comme l'illustrent plusieurs exemples récents.

Explosion dans un conteneur de compression hydrogène

Le 25 juin 2024, le conteneur de compression de la station de distribution d'hydrogène de Gersthofen (Bavière) a subi une explosion, suivie d'un incendie. Cette station venait d'être inaugurée quelques jours auparavant. Les pompiers ont rapidement maîtrisé l'incendie. Il n'y a eu aucun blessé mais des dégâts matériels importants.

Les analyses techniques montrent que la rupture d'une tige de liaison (diamètre ≈ 64 mm) a provoqué une perte d'étanchéité dans le compresseur. Cette tige maintient la cohésion des principaux éléments du compresseur. Sa rupture a entraîné un léger désalignement des pièces, créant un interstice par lequel l'hydrogène sous haute pression s'est échappé à l'intérieur du conteneur.

En quelques instants, une grande quantité d'hydrogène s'est accumulée dans le conteneur, puis s'est enflammée, provoquant une déflagration. L'explosion a arraché une porte du conteneur,



©Gael Kerbaol / INRS / 2018

projetée jusqu'à une clôture à 10 mètres, et a également éjecté le refroidisseur, probablement installé sur la toiture.

L'analyse métallographique de la tige a révélé une rupture fragile intergranulaire, signe d'un traitement thermique inadéquat du matériau.

Explosion d'une station de distribution d'hydrogène

Le 10 juin 2019, une explosion majeure s'est produite dans une station de distribution d'hydrogène à Sandvika (Norvège), à la suite d'une fuite sur un réservoir haute pression causée par une erreur de montage. Bien que l'installation ne soit pas conteneurisée mais simplement entourée d'un bardage métallique, l'accident a entraîné la projection d'éléments lourds, notamment des morceaux du mur coupe-feu, retrouvés à environ 50 mètres, et des dégâts importants dans l'environnement proche. Cet événement, souvent cité, illustre les risques liés aux fuites d'hydrogène et souligne l'importance des procédures de montage et des systèmes de détection, même si son contexte diffère des installations conteneurisées.

Cas de conteneurs de batteries

On peut citer les événements suivants :

- explosion non suivie d'un incendie (Surprise, Arizona, 2019) ;
- explosion suivie d'un incendie (Drogenbos, 2017 ; Liverpool, 2020 ; Perles-et-Castelet, 2020 ; Pékin, 2021) ;
- incendie sans explosion (Geelong, 2021) ;
- incendie de plusieurs conteneurs qui a duré plusieurs jours (Moss Landing, 2025).

Phénoménologies appliquées au conteneur

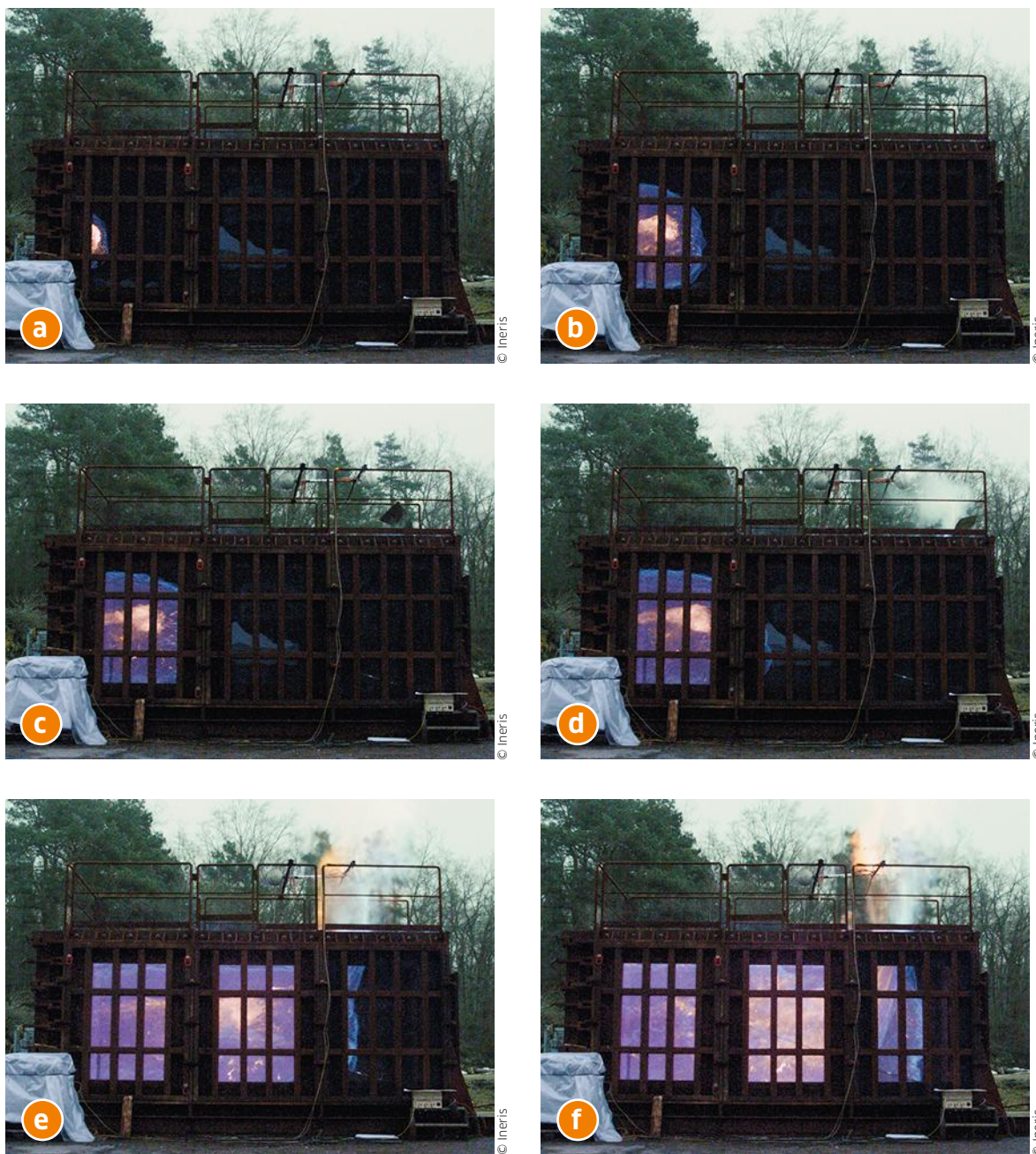
Le conteneur accueillant des systèmes énergétiques constitue un milieu confiné et, selon son encombrement intérieur, le volume libre disponible peut être faible. Il est donc essentiel de comprendre comment une atmosphère explosive peut se former dans ces configurations particulières.

Phénoménologie de la dispersion : formation d'une atmosphère explosive en milieu confiné

Lorsqu'un système contenant un gaz inflammable (par exemple méthane, propane, hydrogène ou gaz issus de l'emballage thermique de batteries)

Exemple de conteneur détourné de son usage d'origine ; ici, activité de nettoyage de filtres à particules.





↑ FIGURE 1 Phénoméologie d'une explosion confinée (chambre de 37,5 m³ ; mélange combustible CO₂/H₂/CH₄ ; panneau d'évent : 1 m² ; pression d'ouverture : 100 mbar).

subit une perte d'étanchéité, le gaz (ou le mélange de gaz) s'échappe dans le volume libre du conteneur et peut conduire à la formation d'une atmosphère explosive (Atex). Ce phénomène résulte de l'accumulation progressive du gaz lorsque celui-ci ne peut être convenablement évacué ou dilué par ventilation. Si sa concentration atteint une plage située entre la limite inférieure (LIE) et la limite supérieure d'explosivité (LSE), un mélange explosif air-gaz se forme. La dispersion du gaz dans le volume libre est influencée par de nombreux paramètres, parmi lesquels la nature physicochimique du gaz (composition, masse volumique...), les

conditions de fuite (pression, température, débit, orientation du jet), la géométrie de l'environnement (volume disponible, encombrement interne) et les conditions de ventilation (naturelle ou mécanique). Dans un espace clos, le nuage inflammable peut occuper tout ou partie de l'espace avec, le cas échéant, des poches localisées dans des zones peu ventilées et présenter une forte stratification.

Phénoméologie de l'explosion

Afin de mieux comprendre le phénomène d'explosion dans cette situation particulière du conteneur, l'Ineris a développé un équipement expérimental

spécifique (Cf. Encadré p. 47). Les principaux résultats des essais menés avec cet équipement sont les suivants :

- Lorsqu'une Atex rencontre une source d'inflammation (étincelle, surface chaude, charge électrostatique...), la combustion s'amorce (Cf. Figure 1a). Les produits de combustion chauds ainsi formés servent à leur tour de source d'inflammation pour les zones avoisinantes. Sur son passage, la flamme transforme le milieu réactif froid en produits de combustion chauds (Cf. Figure 1b). La portion du nuage traversée par la flamme subit une expansion thermique très importante¹. L'expansion thermique du gaz sous l'effet de la combustion est responsable de l'augmentation de la pression interne dans le conteneur. Plusieurs paramètres influencent directement la violence de l'explosion : la composition du mélange (concentration, homogénéité), la nature du gaz (vitesse de flamme, chaleur de combustion), la turbulence initiale, ainsi que la présence d'obstacles internes qui favorisent l'accélération de la flamme et la vitesse de montée en pression dans le conteneur.
- S'il n'existe pas de surfaces fragiles ou d'événements d'explosion, ou s'ils sont mal dimensionnés, la pression interne dans l'enceinte peut augmenter au-delà de la pression de résistance mécanique du conteneur, généralement de l'ordre de 500 mbar. La pression peut alors atteindre un niveau tel que des dégâts importants peuvent être générés, allant de la projection de fragments de l'enceinte jusqu'à sa destruction partielle ou totale. Cette destruction s'accompagne également d'effets de surpression importants sur une distance pouvant atteindre plusieurs dizaines de mètres autour du conteneur.
- Dans le cas où des événements d'explosion ou des surfaces fragiles sont présents, lorsque la pression interne du conteneur atteint leurs seuils de résistance mécanique, ces éléments s'ouvrent et provoquent une dépressurisation partielle de l'enceinte (Cf. Figure 1c). Une partie des gaz frais et brûlés est évacuée. Il y a alors une compétition entre la production de gaz chauds par la flamme et l'évacuation des gaz par les surfaces ouvertes. La pression maximale atteinte dans l'enceinte est alors appelée « pression réduite ». Les gaz expulsés forment un nuage turbulent (Cf. Figure 1d). Lorsque la flamme atteint les surfaces ouvertes, le nuage externe est enflammé (Cf. Figure 1e). La flamme se propage alors dans le nuage externe et génère une explosion externe appelée explosion secondaire. À ce stade, la combustion interne n'est pas terminée. L'explosion externe produit une onde de pression qui se propage dans l'environnement. La surpression interne du volume atteint alors son maximum. Après l'explosion externe, le mélange inflammable restant dans l'enceinte finit

de brûler et les produits de combustion chauds sont évacués par l'évent sous forme de jet chaud (Cf. Figure 1f).

La compréhension fine de cette phénoménologie (dispersion/explosion) est essentielle pour évaluer les scénarios d'accident, dimensionner les dispositifs de sécurité et orienter les mesures de prévention, notamment en matière de détection de gaz, de gestion de la ventilation, de maîtrise des sources d'inflammation et de dimensionnement des surfaces de décharge d'explosion. La connaissance du phénomène permet d'agir tant sur la sécurité de fonctionnement de l'équipement que sur la sécurité des personnes à proximité. Conformément à la réglementation en vigueur pour les travailleurs, une analyse du risque d'explosion dans le conteneur (considéré comme un local) doit être effectuée pour toute mise en œuvre de produits inflammables ou combustibles et, notamment, un zonage Atex doit être établi.

Garantir la sécurité du conteneur

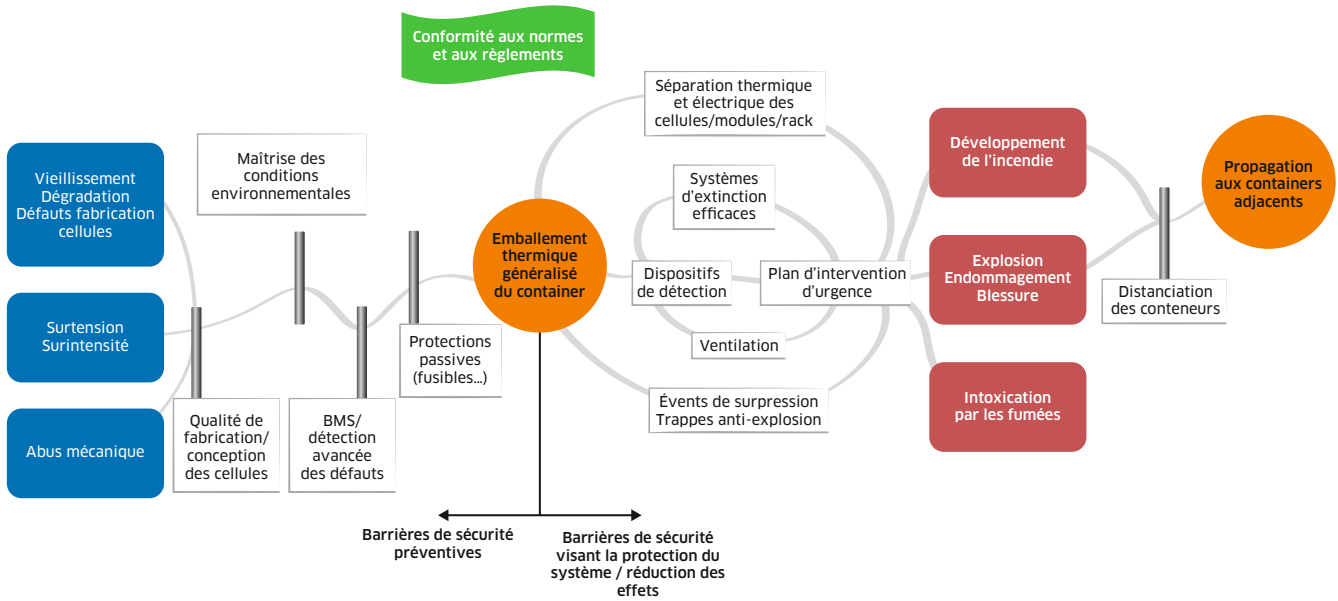
L'étude de sécurité du conteneur, en s'appuyant sur des expérimentations et des modélisations, doit permettre d'adapter sa configuration interne afin de limiter les conséquences d'un événement. Les systèmes électrochimiques de stockage d'énergie et les installations hydrogène sont suffisamment étanches en fonctionnement normal pour ne pas conduire à un risque d'explosion. Aussi, l'enjeu pour ces installations est de garantir la maîtrise des risques en situation accidentelle à la suite, par exemple, d'un emballement thermique de batterie ou d'une fuite d'hydrogène.

Les textes réglementaires existants aux niveaux national, européen et international sont établis pour assurer la maîtrise des risques dans ces situations accidentelles. Cependant, lors de l'assemblage de plusieurs de ces objets énergétiques dans un milieu confiné comme un conteneur, les principaux phénomènes dangereux rencontrés ne sont pas forcément tous bien pris en compte.

Les deux principaux phénomènes dangereux à prendre en compte pour l'étude de sécurité pour un conteneur de batteries Li-ion sont :

- l'incendie consécutif à l'inflammation des gaz émis lors d'un emballement thermique : il s'agit *a priori* de la majorité des incidents (50 cas sur 56 incidents recensés) ;
- l'explosion consécutive à l'accumulation de gaz émis lors d'un emballement thermique et son inflammation retardée : la formation d'une atmosphère explosive puis son inflammation va provoquer une explosion avec projections de débris. Les gaz inflammables émis sont principalement l'hydrogène, des carbonates organiques utilisés comme solvants de l'électrolyte, le monoxyde de carbone et des hydrocarbures légers (méthane,





↑ FIGURE 2 Schéma représentant les barrières de sécurité préventives et de protection des systèmes de stockage de batteries Li-ion conteneurisés [1].

éthylène...). Les sources d'inflammation potentielles sont des surfaces chaudes, des étincelles éjectées lors de l'emballage thermique, des arcs électriques...

Dans la configuration d'un rack de batteries, l'emballage thermique d'une cellule peut se propager aux cellules adjacentes par l'un des mécanismes de transfert de chaleur suivants :

- conduction : contact direct entre les cellules ou entre les cellules et leur bus bar (connecteurs électriques) communs ;
- convection : impact des gaz chauds ;
- rayonnement : impact des flammes.

L'emballage thermique se propage ainsi de cellule en cellule. La libération importante d'effluents

↓ FIGURE 3 Conception de conteneur avec événements d'explosion sur le toit.



gazeux volatils augmente alors la quantité de gaz et vapeurs inflammables présents dans l'atmosphère. Ceci peut conduire à un scénario où une Atex de volume important se forme et génère une explosion de forte intensité. L'accidentologie montre qu'un rack de batteries (généralement constitué d'une dizaine de modules) peut générer suffisamment d'effluents gazeux pour atteindre les conditions d'une explosion. Le volume de gaz émis avant inflammation, variable selon les sources, serait de l'ordre de 0,3 L/Wh à 6 L/Wh.

Lors de la conception et de la mise en œuvre d'un système de stockage conteneurisé avec des batteries Li-ion, il est donc nécessaire de tout mettre en œuvre afin que :

- l'apparition d'un incendie, voire d'un événement précurseur (émission de vapeur/gaz) soit détectée et signalée à un stade précoce par la détection ;
- la propagation du feu soit limitée voire supprimée à un stade précoce ;
- la structure soit protégée contre une explosion causée par l'accumulation et l'inflammation des gaz émis lors d'un emballage thermique ;
- l'intervention des services d'urgence puisse être réalisée en sécurité.

Ainsi, des barrières performantes et efficaces « multicouches » doivent être mises en place à toutes les échelles (cellules, modules, racks, systèmes, parc batteries, conteneur) afin de minimiser la propagation en cascade d'un emballage thermique à partir d'une cellule ou d'un module et d'atténuer les conséquences associées à un incendie ou à une explosion ou encore à un dégagement de gaz toxiques et inflammables. Il s'agit de barrières de sécurité préventives et de protection. Ces barrières sont représentées sur la Figure 2.

Les barrières préventives comprennent notamment :

- la qualité de fabrication et de conception des cellules;
- la maîtrise des conditions environnementales;
- les fonctions de sécurité assurées par le BMS (battery management system);
- la détection redondante des défaillances et les actions associées;
- le report des alertes/alarmes en temps réel dès la mise en service du système;
- la protection passive du système (disjoncteurs, fusibles ou autres éléments passifs de protection contre les surtensions).

L'analyse de l'accidentologie montre que chacune des barrières préventives recensées ci-dessus a été défaillante dans au moins un incident impliquant un système de stockage stationnaire.

Les barrières de protection comprennent notamment :

- les matériaux assurant une isolation thermique;
- les dispositifs d'extinction;
- la protection contre les explosions (ventilation, trappes anti-explosives);
- les règles de conception visant la non-propagation d'un événement au sein du conteneur mais aussi de conteneur en conteneur tels l'ajout de dispositifs d'extinction;
- l'élaboration d'un plan d'intervention d'urgence.

L'analyse de l'accidentologie montre que, lors des différents accidents, soit la barrière de protection a été inefficace (dispositif d'extinction par exemple), soit le système de stockage ne disposait pas de cette barrière (événement d'explosion par exemple, Cf. Figure 3).

Les systèmes d'extinction à base de gaz/aérosol, qui peuvent être efficaces contre les incendies dans l'ensemble du système en dehors des batteries, peuvent être complétés par un système d'extinction à base d'eau localisé sur les modules en feu et par une ventilation adéquate pour éliminer rapidement l'agent s'il est inefficace (c'est-à-dire si la température du système continue à augmenter).

De nombreux conteneurs sur le marché aujourd'hui n'ont pas les dispositifs nécessaires à la prise en compte de l'accumulation de gaz inflammables et du risque d'explosion. Compte tenu des retours d'expérience de l'accidentologie, des conceptions récentes de conteneur prévoient des événements d'explosion sur le toit, dimensionnés pour s'ouvrir en cas d'explosion, ainsi que des dispositifs de ventilation pouvant être actionnés manuellement ou automatiquement sur détection de gaz inflammables.

Des difficultés d'intervention ont été remontées dans les rapports d'analyse d'accident. L'élaboration d'un plan d'intervention d'urgence et la formation des premiers intervenants et des secours extérieurs est essentielle pour assurer une intervention sûre lors d'un événement sur ce type de stockage d'énergie.

ENCADRÉ

CHAMBRE D'EXPLOSION DE 37,5 M³ DE L'INERIS : ESSAI D'UN CONTENEUR À L'ÉCHELLE 1

L'Ineris dispose d'une chambre d'explosion de 37,5 m³ dont les dimensions sont similaires à celles d'un conteneur ISO de 20 pieds (Cf. Figure 4). Cette installation unique dispose d'une paroi transparente permettant la visualisation des phénomènes d'explosion interne ; sa résistance mécanique à la surpression d'explosion est de l'ordre de 3 bar.



↑ FIGURE 4 Chambre d'explosion de 37,5 m³.

Enfin, des évolutions importantes des normes, notamment à l'international (exemple de documents normatifs : UL 9540A, NF EN IEC 62933-5-2, NFPA 855 [2,4]) sont en cours dans le but de renforcer les dispositions de prévention et de protection, d'améliorer la sécurité des systèmes de stockages stationnaires et de protéger efficacement les installations et les personnes. ●

1. Le volume du nuage initial subit, après combustion, une expansion d'environ sept fois son volume pour un mélange hydrogène/air stœchiométrique.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] CHRISTENSEN P. – *Electric vehicles and risks to first responders*. Newcastle university, Webinar No. 38, FABIG 21.09.22. Accessible sur : <https://www.fabig.com/publications-and-videos/online-lectures-webinars/webinar-038/>
- [2] NORME UL 9540A – *Test method for battery energy storage systems (BESS)*. Accessible sur : <https://www.ul.com/services/ul-9540a-test-method>
- [3] NORME NF EN IEC 62933-5-2 – *Systèmes de stockage de l'énergie électrique (EES). Partie 5-2 : exigences de sécurité pour les systèmes EES intégrés dans un réseau – Systèmes électrochimiques*. Afnor, 2020. Accessible sur : <https://www.boutique.afnor.org/fr> (site payant).
- [4] NORME NFPA 855 – *Standard for the installation of stationary energy storage systems*. NFPA, 2026. Accessible sur : <https://www.nfpa.org/codes-and-standards/nfpa-855-standard-development/855>

ASSURER UNE CONCEPTION EFFICACE DES BARRIÈRES DE SÉCURITÉ INCENDIE ET EXPLOSION

Cet article partage les bonnes pratiques d'ingénierie de sécurité incendie et explosion, appliquées aux nouvelles filières de l'énergie, en listant les points de vigilance à travers le choix et le dimensionnement des différentes mesures de prévention.

LAURENT
PARIS,
VIRGINIE
DREAN
Efectis

L'essor des filières batteries et hydrogène a vu émerger de nouveaux acteurs qui ne disposent pas toujours de la culture sécurité des acteurs historiques de l'énergie.

L'environnement fortement concurrentiel dans ces secteurs pousse certains développeurs de briques technologiques (par exemple électrolyseurs, piles à combustible, batteries ou réservoirs) à prioriser la mise sur le marché avec une approche focalisée principalement sur le produit au détriment d'une approche système. L'intégration revient alors à l'opérateur qui n'est pas nécessairement suffisamment informé et compétent sur les aspects de sécurité. Enfin, les approches prescriptives existantes (règles

et normes actuelles) ne sont pas forcément adaptées pour ces nouvelles applications.

Une meilleure prévention des risques dans ces filières s'appuiera sur :

- la réalisation d'analyse des risques pour les systèmes dès la phase de conception ;
- l'appropriation des bonnes pratiques et des méthodes des filières existantes comme celles du pétrole et du gaz ;
- le recours à une approche performantielle de la sécurité incendie et explosion, basée sur l'atteinte des objectifs de sécurité et non sur le respect de prescriptions (Cf. pp. 56-60), permettant de développer des solutions adaptées et innovantes.



© Fabrice Dimier pour l'INRS / 2025

Cet article s'attache à partager le retour d'expérience acquis ces dernières années quant aux bonnes pratiques d'ingénierie de sécurité incendie et explosion, appliquées aux nouvelles filières de l'énergie, en pointant les points de vigilance à travers le dimensionnement des barrières de sécurité.

Gestion des risques incendie et explosion

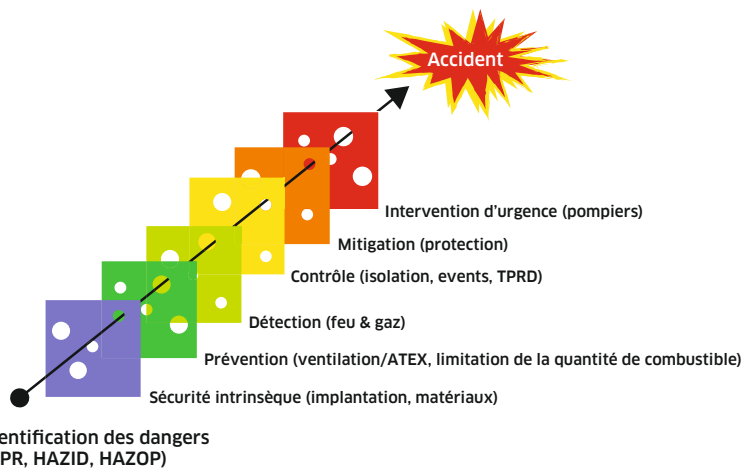
Barrières de sécurité

En amont de l'application de la méthode des barrières de sécurité, il convient de définir avec l'ensemble des parties prenantes (utilisateurs, concepteurs, autorités) les objectifs de sécurité et les exigences de performance à satisfaire pour chaque barrière (seuil d'acceptabilité). Cette étape doit également intégrer les exigences spécifiques telles que celles émises par les assureurs ou sociétés de certification.

Le principe fondamental de la méthode consiste à introduire différentes couches, visant à réduire la fréquence ou la gravité d'un danger (Cf. Figure 1 – terminologie issue de la norme NF EN ISO 13702 [1]).

Ces différentes barrières peuvent être passives ou actives, avec une action potentielle sur la fréquence ou la gravité. La valorisation de ces barrières dans les analyses de sécurité permettra de parler alors de conséquences résiduelles.

Chaque barrière doit être dimensionnée sur la base de scénarios crédibles afin de couvrir l'ensemble des risques jusqu'au seuil d'acceptabilité. Les scénarios de dimensionnement peuvent être corrélés à une fréquence d'occurrence.



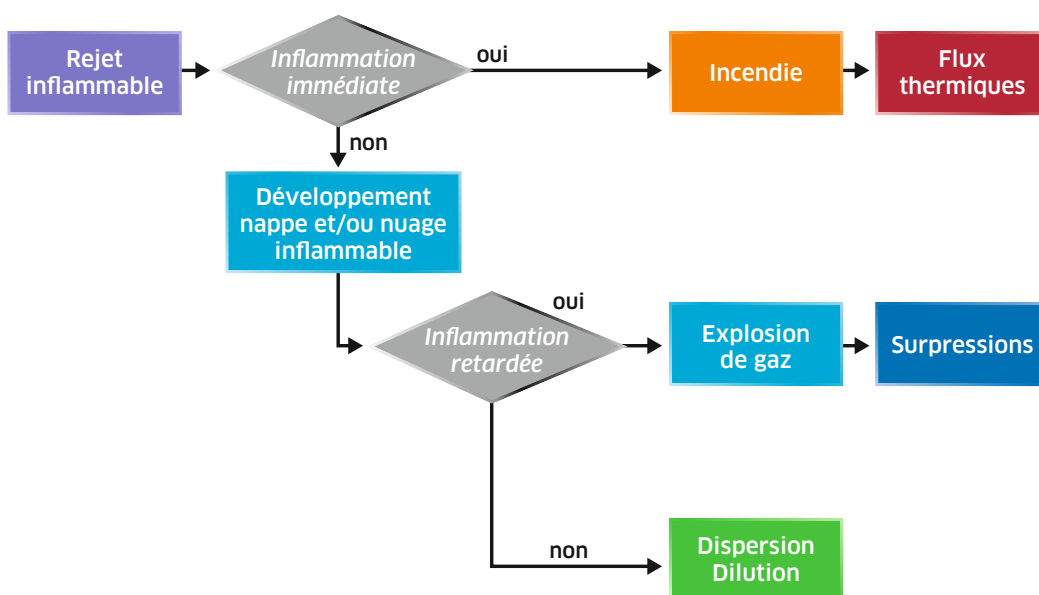
Identification des dangers

La première étape consiste à identifier les situations dangereuses, pour ensuite développer un arbre d'événements des conséquences potentielles (Cf. Figure 2). Cette approche s'appuie sur des techniques d'analyse usuelles menées en groupe d'experts pluridisciplinaire et permet ensuite de définir des scénarios accidentels pour le dimensionnement des barrières de protection.

Parmi ces techniques d'analyse, deux méthodes sont généralement utilisées lors du développement d'un projet car elles ont un impact fort sur la conception des barrières de sécurité :

- l'Hazop (*Hazard & operability*) : analyse systématique des risques liés aux dérives de procédés (système) ;
- l'Hazid (*Hazard identification*) : analyse systématique des interactions entre le système et son environnement.

↑ FIGURE 1
Vue d'ensemble des barrières de sécurité et d'atténuation des effets.



← FIGURE 2
Exemple d'arbre d'événements consécutif à une fuite sur une canalisation contenant un liquide inflammable.

ENCADRÉ 1

EXEMPLE DE MISE EN ÉVIDENCE DE L'INTÉRÊT D'UNE ANALYSE HAZID

Les groupes électrogènes à hydrogène apparaissent comme une alternative intéressante pour les utilisateurs. Cette solution n'émet pas directement de CO₂ et son fonctionnement est plutôt silencieux. En revanche, le stockage et la mise en œuvre d'hydrogène à haute pression nécessitent de s'interroger sur les interactions avec l'environnement d'exploitation (agressions externes et conséquences pour l'environnement).

• **Cas 1 : Alimentation isolée après défaillance du réseau électrique local suite à un événement intempêtif**

L'installation d'un tel équipement dans une zone isolée n'est pas de nature à générer des risques inacceptables : les agressions externes potentielles sont limitées ou facilement maîtrisables (probabilité faible). Une fuite sur le système hydrogène n'est pas de nature à générer des conséquences sévères sur les personnes à proximité.

• **Cas 2 : Alimentation à proximité d'un festival afin d'éviter les nuisances sonores et l'émission directe de CO₂**

D'une part, le public nombreux et imprévisible est une menace potentielle difficile à gérer pour l'installation située à proximité et, d'autre part, en cas de fuite, les conséquences seraient désastreuses pour les personnes.

Ces deux cas antagonistes illustrent la nécessité pour le même système de réaliser une analyse des risques de type Hazid même modeste afin de statuer sur l'acceptabilité et de définir des barrières techniques adaptées à la situation.

d'analyses de risques. Une approche courante est l'approche semi-quantitative reposant sur une matrice d'acceptabilité (Cf. Tableau 1) comportant plusieurs niveaux de risque. L'exemple ci-dessous comporte trois niveaux de risque, définissant trois zones de risque.

Le principe fondamental est de réduire le niveau des risques en zones 2 et 3 à un niveau acceptable (zone 1) préalablement défini (approche Alarp : *as low as reasonably practicable*) en s'appuyant sur le dimensionnement de barrières de sécurité appropriées.

Il convient de préciser que dans une approche performantielle réaliste, et eu égard au fait qu'un risque résiduel ne peut être écarté, il est nécessaire de définir préalablement les critères d'acceptabilité du risque. Il est en effet essentiel que l'ensemble des acteurs (assureurs, opérateurs, ingénierie, constructeur et bureau de contrôle) s'accordent d'abord sur les objectifs de sécurité puis sur le niveau de risque acceptable pour le projet compte tenu des enjeux.

Pour les technologies émergentes (systèmes de batteries stationnaires ou installations hydrogène), la principale difficulté réside dans la quantification des fréquences d'occurrence en l'absence de banque de données fiables issue du retour d'expérience et de l'accidentologie, comme cela peut être le cas dans le secteur industriel traditionnel. À l'heure actuelle, la transposition du retour d'expérience d'autres secteurs d'activité doit être privilégiée, tout en s'assurant de bien identifier les spécificités de ces nouvelles applications pour adapter les valeurs, en ayant une lecture critique des données existantes.

Sécurité intrinsèque

La sécurité intrinsèque n'est pas une barrière technique à proprement parler, mais consiste en la mise en œuvre de bonnes pratiques issues du retour d'expérience lors de la conception, notamment :

- réduire les potentiels de dangers (choix des procédés, conditions opératoires, nature et phase des produits mis en œuvre, limitation des quantités) ;
- sélectionner des matériaux constitutifs adaptés à l'application, comme dans le cas de l'hydrogène ;
- isoler et espacer les zones à risque par rapport aux personnes (distances de sécurité) ;
- assurer un compartimentage et un arrangement interne limitant la propagation.

Ces principes permettent de réduire à la fois l'occurrence des phénomènes accidentels et leur gravité. Dans une perspective de densification du stockage de l'énergie (haute pression pour l'hydrogène, augmentation des densités d'énergie pour les batteries au lithium), ces principes fondamentaux peuvent être complexes à satisfaire et sont souvent

Conséquences	Significatives	2	2	3	3
	Moyennes	1	2	2	3
	Faibles	1	1	2	2
	Négligeables	1	1	1	2
Matrice d'acceptabilité des risques	Négligeable	Faible	Moyenne	Élevée	
	Fréquences				

↑ TABLEAU 1 Matrice d'acceptabilité des risques semi-quantifiée.

La méthode Hazop est menée naturellement par les concepteurs de briques technologiques car elle concerne directement le produit et son fonctionnement (process). Elle permet de définir des barrières de sécurité intrinsèques, de prévention, voire de contrôle.

La méthode Hazid vise à évaluer l'intégration de la brique technologique dans un système plus large et donc d'identifier les interactions avec son environnement. Elle est spécifique à chaque projet et nécessite une attention particulière en regard des enjeux de sécurité. Les situations accidentelles sont traitées lors de cette revue (Cf. Encadré 1).

L'analyse des dangers peut être complétée en intégrant la fréquence d'occurrence. Il s'agit alors

remis en cause, obligeant à durcir les autres barrières pour atteindre le niveau de sécurité requis.

Prévention

Les barrières de prévention visent principalement à réduire l'occurrence des événements indésirables. Parmi les mesures envisageables, la ventilation est une barrière usuelle vis-à-vis du risque d'explosion mais peut être aggravante pour le risque incendie. La ventilation peut être naturelle, avec des variations potentielles en regard des conditions ambiantes, ou mécanique, maîtrisée mais nécessitant alors une maintenance régulière afin d'en garantir la fiabilité.

Pour les applications conteneurisées (groupe électrogène hydrogène ou poste de stockage par batteries), le système de ventilation doit être suffisamment dimensionné pour permettre la dilution des émissions éventuelles risquant de former un mélange explosif. Une ventilation d'urgence peut également être activée sur détection de gaz. Cependant, en cas d'incendie, il est préférable de réduire l'apport d'oxygène en agissant sur la ventilation. Ces deux exigences étant antagonistes, il est nécessaire d'avoir une approche équilibrée en vue de prendre les meilleurs choix selon la stratégie de sécurité définie (Cf. Encadré 2).

Détection feu et gaz

Les barrières de détection feu et gaz ont un double objectif :

- alerter le personnel et permettre l'évacuation (réduction de la gravité pour les personnes situées à proximité du danger) ;
- réduire le potentiel de danger par la mise en sécurité de l'installation (Cf. « Contrôle et atténuation des effets » p. 52).

La philosophie de détection doit s'inscrire dans une stratégie de sécurité globale en cohérence avec le dimensionnement des autres barrières en se référant aux objectifs de sécurité définis. La conception du système de détection doit prendre en compte les aspects suivants :

- la nature du scénario de feu et de l'émission : caractéristiques du foyer, produits émis, taille de l'orifice de fuite, position, direction, probabilité... ;
- le choix d'une logique de détection : par exemple définir des actions en fonction de l'activation d'un certain nombre de détecteurs ;
- le choix d'un ou plusieurs seuils de détection, par exemple pour un scénario d'émission et de risque d'explosion : 20 % LIE, 50 % LIE, et pour un scénario de feu : détection de fumées ou de monoxyde de carbone ;
- le temps de détection maximum requis et la réactivité du système pour chaque scénario ;
- le taux de couverture (pourcentage de l'espace couvert par un ou plusieurs détecteurs),

ENCADRÉ 2 GARANTIR UN ZONAGE ATEX ADAPTÉ À SON ENVIRONNEMENT GRÂCE À LA SIMULATION

Une mesure de prévention systématiquement mise en œuvre pour prévenir la formation d'une atmosphère explosive (Atex) consiste à mettre en place un taux de renouvellement d'air horaire permettant théoriquement d'éviter l'atteinte d'une fraction de la limite inférieure d'explosivité (LIE), généralement de 20 à 25 %.

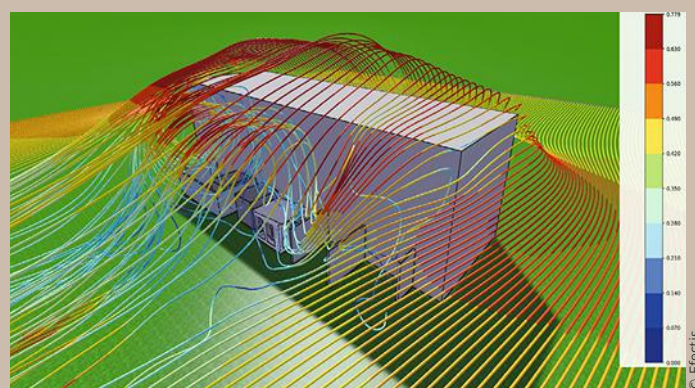
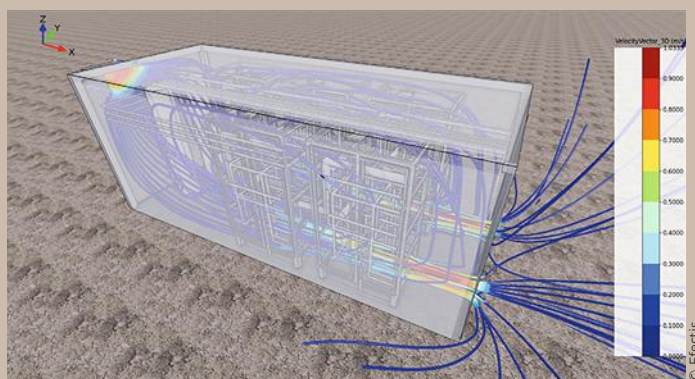
Cette approche est cependant limitée car elle considère une concentration moyenne et ne prend en compte que de manière limitée les paramètres suivants :

- caractéristiques de l'émission dans le scénario de dimensionnement (débit, composition) ;
- nature de la ventilation (naturelle/mécanique) ;
- encombrement interne et zones de recirculation ou zones mortes ;
- environnement du système (distances minimales d'un bâtiment) notamment pour les entrées d'air.

Les analyses menées avec des outils numériques de mécanique des fluides (CFD) permettent de prendre en compte tous ces aspects et de parvenir à un zonage Atex bien plus réaliste en intégrant par exemple le risque de formation de poches de gaz inflammable localement en raison de l'hétérogénéité du milieu.

La CFD peut également être utilisée en conception (par exemple, positionnement et débit des ventilations) ou pour quantifier les effets en cas d'explosion.

Toutefois, ces analyses nécessitent un niveau de détails et de compétences suffisant pour être pertinentes. Il est donc préférable d'exploiter des modèles simples en début de conception et de valider celle-ci par la CFD dans les étapes ultérieures lorsque le projet est plus mature.



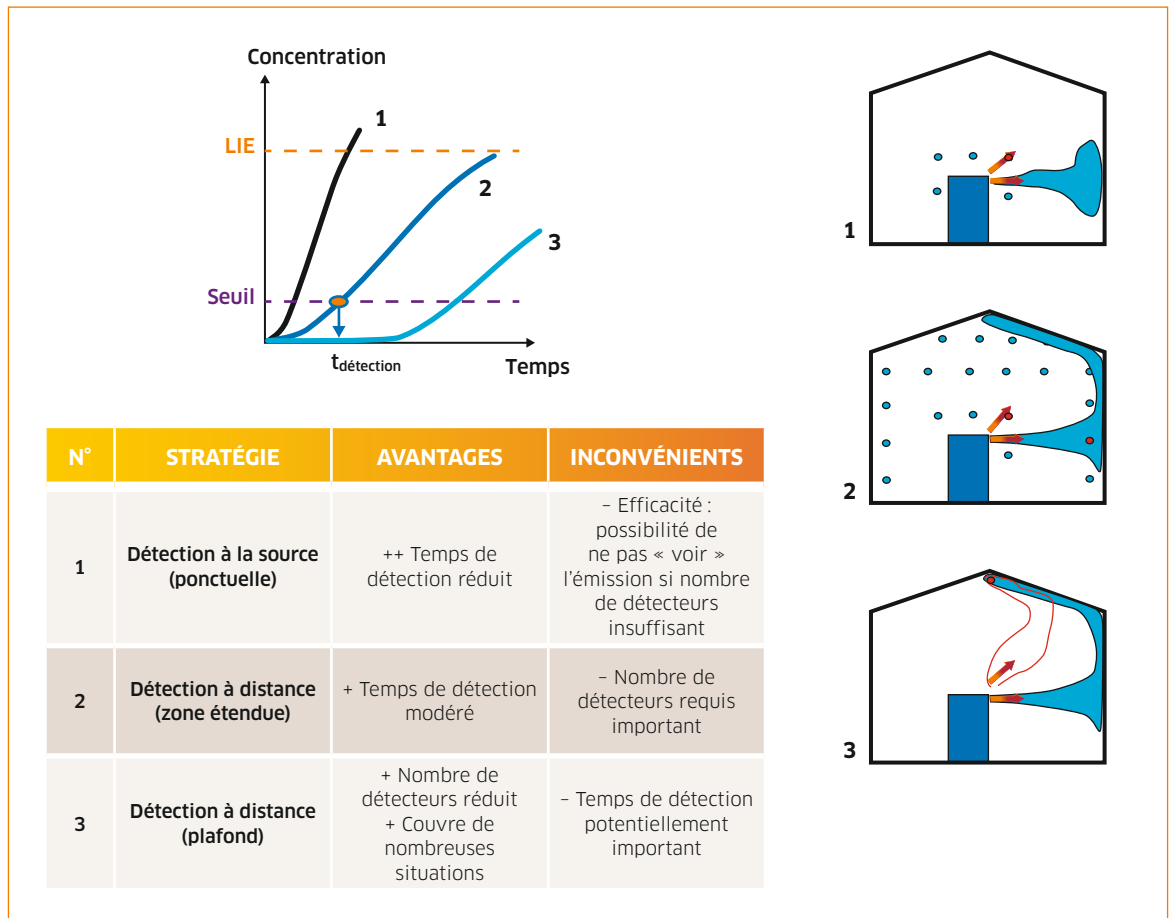


FIGURE 3 → Exemples de différentes stratégies de détection pour une émission d'hydrogène sous pression matérialisée par les flèches rouges.

en prenant en compte l'encombrement de la zone (facteur limitant pour la réactivité du système) ;

- la combinaison de plusieurs technologies/la redondance pour atteindre un niveau de fiabilité souhaité et notamment éviter les alarmes intempestives.

La conception d'une détection performante doit considérer différents scénarios probables, en prenant en compte leur fréquence d'occurrence et les conséquences attendues pour évaluer l'acceptabilité du risque de non-détection.

Dans la pratique, dans un scénario d'émission de produits inflammables, il paraît illusoire de vouloir tout détecter car ces émissions sont directionnelles avant de rencontrer un obstacle. La Figure 3 illustre différentes stratégies qui peuvent être mises en place dans un local fermé en l'absence de ventilation pour détecter une émission d'hydrogène sous pression ou au niveau de l'évent d'une batterie lors d'un emballement thermique.

Enfin, pour assurer un maintien des performances de cette barrière « détection » dans le temps, il est nécessaire de considérer l'aspect « maintenance » du système pendant toute la durée de vie de l'ouvrage.

Contrôle et atténuation des effets

Sur la base d'une détection confirmée, des actions peuvent être effectuées afin d'atténuer les effets de l'événement accidentel considéré (Cf. Tableau 2). De manière pratique, il convient d'agir sur l'intensité de l'événement accidentel et/ou sur sa durée par la limitation de la quantité de combustible ou d'air disponible, voire d'agir sur les sources d'inflammations potentielles.

Le contrôle des effets s'apparente à la mise en place de mesures de mitigation selon la terminologie française, mais se distingue des mesures de protection (visant à gérer le risque résiduel) dans les normes internationales (telles que NF EN ISO 13702 [1]). Les barrières de contrôle sont actives (et donc associées à une certaine réactivité et fiabilité), alors que les barrières de protection sont plutôt passives, et par essence fiables sous réserve d'être entretenues.

L'interaction entre les risques incendie et explosion doit être évaluée afin de s'assurer du meilleur compromis dans la gestion globale des risques.

Les dispositifs de protection des systèmes sous pression (Cf. Encadré 3) peuvent être complémentaires mais doivent surtout être définis en fonction

DISPOSITIF	OBJECTIF	PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT	LIMITATIONS
Parois de décharge active	Réduire les surpressions engendrées dans un environnement confiné.	Ouverture d'un événement après atteinte d'un seuil de surpression prédéfini.	Propagation à l'extérieur des flammes et de l'onde de surpression.
Sprinklage	Contrôler et/ou éteindre un incendie.	Libération d'eau après atteinte d'un seuil de température prédéfini ou manuellement après détection.	Explosion, le sprinklage étant générateur de turbulence pouvant favoriser ou aggraver une explosion.
Noyage	Refroidir et éviter la propagation d'un emballage thermique d'une batterie.	Injection d'un fluide caloporteur permettant d'absorber et d'évacuer la chaleur dégagée par la réaction et faire baisser la température.	Nécessite la proximité d'un bac de noyage et la manipulation de la batterie vers le bac.

↑ TABLEAU 2 Exemples de barrières de contrôle (non exhaustifs).

de la nature des scénarios d'agression à considérer, qu'ils soient d'origine interne ou externe.

Concernant les disques de rupture ou les événements, un compromis doit être défini, lors du dimensionnement en conception, entre les effets déchargés à l'extérieur de l'équipement et sa résistance. En effet, une faible surface d'événement conduira à limiter les effets externes mais la résistance à la pression de l'équipement devra être plus importante. Réciproquement, une surface d'événement importante minimisera les pressions internes mais conduira à des zones d'effets externes accrues. (Cf. Figure 4).

Les caractéristiques des surfaces d'événements peuvent être évaluées sur la base de corrélations empiriques simplifiées pour les situations les plus simples, ou par des outils de simulation en mécanique des fluides (CFD) dans les cas les plus complexes (mélange réactif particulier, encombrement de la zone). Les données expérimentales montrent que l'accélération de la flamme peut être très importante lorsque la teneur en hydrogène est élevée (applications hydrogène, gaz d'emballage de batteries pour certaines chimies). Par conséquent, il convient de s'assurer d'une réactivité suffisante des événements afin d'assurer une atténuation significative des effets.

Concernant les dispositifs de type TPRD (Cf. Encadré 3), leur efficacité dépend fortement de leur localisation et des caractéristiques de l'incendie (taille et durée). En effet, des essais menés par Efectis ont montré qu'une exposition au feu localisée à distance des TPRD sur un réservoir peut conduire à une dégradation thermique et mécanique de l'enveloppe, notamment lorsque des matériaux composites sont utilisés, avec une activation tardive des dispositifs de sécurité dans le meilleur des cas. Cet incendie peut être par exemple un feu de pneumatiques, un feu de nappe de fuel ou un jet enflammé d'hydrogène issu d'un réservoir adjacent. Dans cette configuration, l'éclatement du réservoir peut intervenir rapidement, avant même que l'incendie ne se propage jusqu'à la TPRD. Outre sa

ENCADRÉ 3

DISPOSITIFS DE CONTRÔLE ET DE PROTECTION DES SYSTÈMES SOUS PRESSION

Sur les appareils sous pression, il est généralement prévu un ou plusieurs dispositifs de sécurité afin d'éviter le scénario de rupture brutale de l'enveloppe en cas de pressurisation excessive :

- **Soupape** : elle vise à réguler et limiter la pression interne d'un équipement suite à une dérive de procédé (par exemple, un emballage thermique dans un réacteur ou une batterie). La soupape s'active à partir d'une consigne de pression et permet d'évacuer de manière contrôlée une partie du contenu pour faire baisser la pression interne. L'activation est mécanique, passive, automatique et réversible. Le dimensionnement des soupapes s'appuie sur les résultats de l'Hazop et des règles de calcul prescriptives maîtrisées par l'industrie.
- **Dépressurisation d'urgence** : elle vise à évacuer le contenu vers une zone sécurisée identifiée et prévue à cet effet (événement ou torche). Ce dispositif peut s'activer, après fermeture des vannes d'alimentation de l'appareil sous pression, manuellement ou automatiquement sur détection. L'activation est irréversible. Les scénarios de dimensionnement sont liés aux dérivés de procédés ou à une agression externe de type incendie. L'activation peut également être préventive, avant que l'agression ne soit effectivement présente.
- **Disque de rupture** : il est généralement complémentaire aux mesures précédentes et permet de réduire brutalement la pression par son ouverture calibrée sur la résistance de l'enveloppe. Ce système est passif.
- **Paroi de décharge ou événement d'explosion** : ce sont des éléments soufflables mis en place sur des ouvrages devant résister à une explosion interne. Ils s'apparentent à des disques de rupture de grandes dimensions.
- **TPRD (Temperature pressure relief device)** : ce dispositif est mis en place sur les réservoirs à haute pression tels que ceux destinés aux applications de mobilité hydrogène. Un fusible thermique déclenche l'ouverture irréversible d'un orifice à une température donnée, permettant de réduire brutalement la pression dans l'enveloppe. Ce dispositif passif est conçu pour les réservoirs exposés à un incendie.



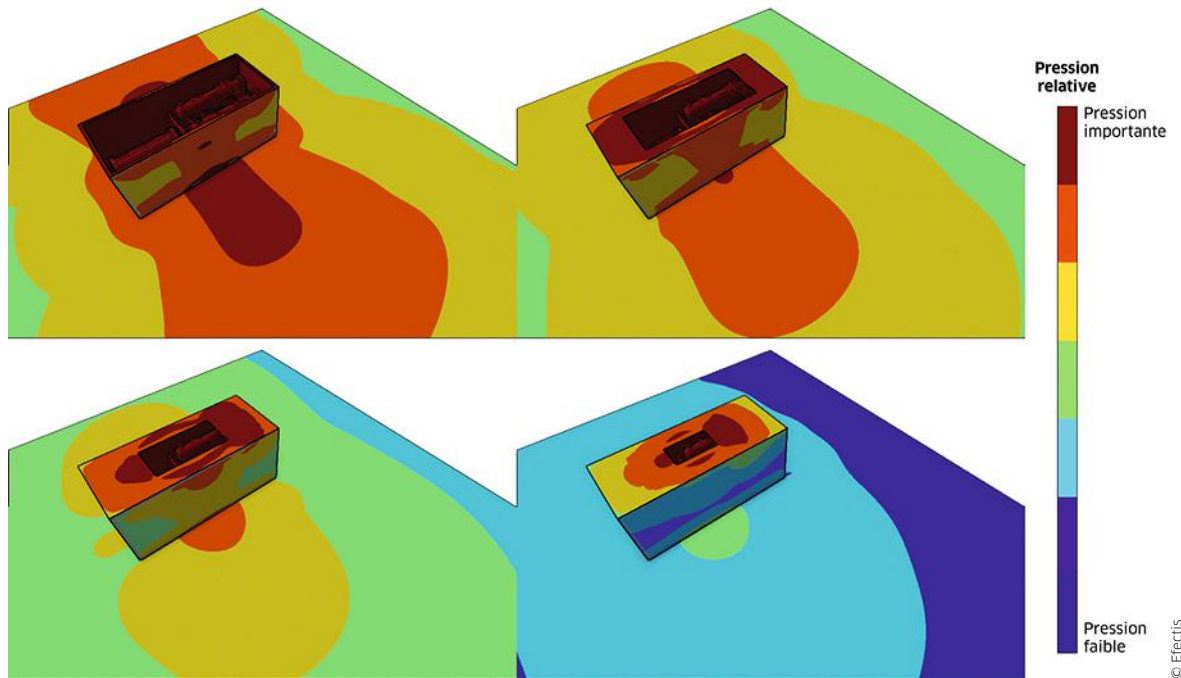


FIGURE 4 → Simulations de l'influence de la surface d'événements sur les zones d'effets de surpression autour d'une solution conteneurisée.

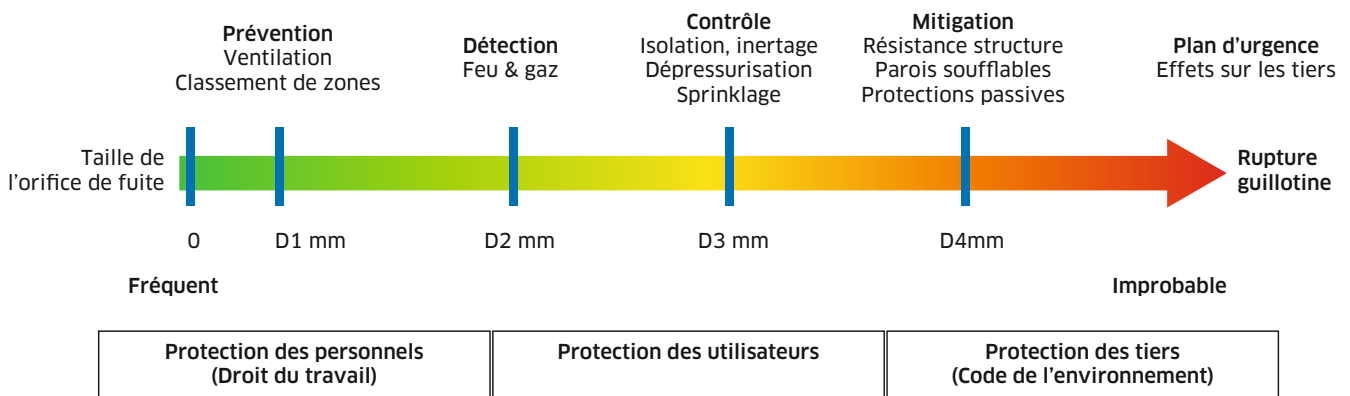
localisation, il convient de considérer l'inertie thermique et l'échauffement progressif de la bille de verre qui obture le dispositif de décharge de pression.

Protection contre les effets

Concernant la protection vis-à-vis des effets d'une explosion, le dimensionnement des ouvrages doit être effectué selon des méthodes adaptées permettant de prendre en compte, d'une part, des chargements (surpression) de forte intensité mais de durée très brève, et d'autre part, la capacité des matériaux au-delà de leur limite élastique (déformations résiduelles après l'événement). Le principe est de s'assurer que les objectifs de sécurité sont satisfaits moyennant des réparations plus ou moins conséquentes.

Concernant la protection vis-à-vis des effets d'un incendie, le dimensionnement des ouvrages s'appuie souvent sur les critères de performance traditionnels tel que le degré de résistance au feu normalisé (REI). Cette approche est néanmoins discutable car les nouvelles technologies (batteries, hydrogène) engendrent potentiellement des incendies et des effets d'une nature différente, avec une intensité accrue et, potentiellement, des projections de particules incandescentes qui peuvent favoriser l'érosion des matériaux de protection. Il n'existe malheureusement pas encore à ce jour d'essais normalisés permettant de justifier de la tenue des matériaux dans ce contexte. Il est donc nécessaire de faire progresser les connaissances sur ces sujets par des essais en vue d'élaborer des recommandations plus pertinentes.

↓ FIGURE 5 Approche progressive de dimensionnement des barrières pour une fuite d'hydrogène.



Intervention d'urgence

De manière générale, la mission des secours est de protéger les personnes et de s'assurer que les conséquences sur les tiers restent limitées. Il convient néanmoins de s'assurer que les secours puissent gérer la situation de manière efficace sans se mettre en danger. De même que précédemment, les connaissances sur les risques induits par ces nouvelles technologies sont en cours d'acquisition et seul le retour d'expérience permettra de définir des stratégies et des procédures d'intervention adaptées à chaque situation.

Dimensionnement des barrières

Caractérisation des scénarios

Un panel de scénarios accidentels, allant du plus fréquent avec des conséquences limitées au moins fréquent avec des conséquences majeures, doit être étudié afin de couvrir l'ensemble des risques jusqu'au seuil d'acceptabilité. Une attention toute particulière doit être portée sur les scénarios « intermédiaires » qui sont souvent dimensionnants, avec une intensité et une durée modérée, mais une fréquence significative en regard de la durée de vie de l'ouvrage.

Adéquation des barrières aux enjeux

Chaque barrière est dimensionnée de manière performantielle pour des scénarios d'une gamme d'intensité et de fréquence donnée. Par exemple pour une fuite, la barrière de prévention va couvrir les petites fuites, la barrière de détection traitera des fuites intermédiaires, etc. (Cf. Figure 5). Cela permet de couvrir l'ensemble des scénarios et d'éviter un dimensionnement inadéquat des barrières.

En regard de ces différentes tailles de fuite, les objectifs de sécurité concernant les personnes peuvent être également structurés, assurant ainsi l'articulation entre les prescriptions du droit du travail et la réglementation ICPE¹ lorsque celle-ci est applicable.

Cohérence des méthodes et des outils pour le dimensionnement

Le choix des méthodes et des outils pour le dimensionnement des barrières doit être adapté aux enjeux et à la phase du projet. Les bonnes pratiques en matière d'ingénierie de sécurité incendie et explosion nécessitent au préalable une bonne compréhension des phénomènes physiques impliqués, afin de pouvoir s'adapter et exploiter les outils appropriés en regard de leur domaine d'applicabilité. De plus, selon la disponibilité et la robustesse des données d'entrée, il est nécessaire d'adapter les choix pour les modélisations en privilégiant les études de sensibilité² qui permettent de mieux évaluer quels paramètres ou données d'entrée sont les plus critiques pour la suite du développement. De manière générale, il est donc recommandé d'avoir une vision d'ensemble de la problématique

en combinant les expertises de chacun, depuis l'analyse des risques jusqu'à la solution technique. Ceci permet d'optimiser le dimensionnement, tout en assurant une cohérence et une démonstration robuste des niveaux de sécurité atteints.

Conclusions et perspectives

L'émergence des nouvelles technologies dans le secteur de l'énergie, que ce soit au niveau de la mobilité ou des applications stationnaires, génèrent de nouveaux risques qu'il convient d'appréhender de manière globale.

Le développement de projets sûrs nécessite la sensibilisation des acteurs au regard :

- des propriétés spécifiques des produits et systèmes ainsi que des dangers potentiels associés ;
- des applications variées (fixe, mobile) et des cultures/réglementations applicables ;
- de l'intégration dans un environnement existant pouvant être complexe (encombrement/confinement) et incertain (agressions) ;
- des enjeux (présence de salariés ou du public à proximité, intégration à l'habitat).

Les approches prescriptives existantes, en termes de règles et normes actuelles, ne sont pas forcément adaptées pour ces nouvelles applications. Une approche structurée de la gestion des risques et des barrières de sécurité est néanmoins nécessaire. Une approche performantielle est particulièrement adaptée pour gérer ces nouveaux risques en s'appuyant sur un dimensionnement adéquat des barrières de sécurité actives et passives qui sont complémentaires, mais il reste essentiel de comprendre les phénomènes physico-chimiques en jeu, notamment leur cinétique et leurs effets, pour pouvoir s'y adapter.

Il est ainsi nécessaire de poursuivre et d'accentuer les travaux de recherche, et notamment de favoriser la réalisation d'essais, afin de disposer d'outils de prédiction (modélisation) pertinents, même si cela reste assez difficile compte tenu de l'évolution permanente des technologies.

Enfin, l'approche performantielle nécessite un suivi pendant toute la durée de vie de l'ouvrage ou de l'équipement et une gestion des modifications en vue, au minimum de maintenir, voire de réduire les niveaux de risque dans le temps. ●

1. Installation classée pour la protection de l'environnement.
2. Étude consistant à faire varier les paramètres d'entrée afin d'évaluer leur influence sur le résultat final dans un outil ou une méthode de calcul.

BIBLIOGRAPHIE

[1] NORME NF EN ISO 13702 – Industries du pétrole et du gaz. Contrôle et atténuation des feux et des explosions dans les installations en mer - Exigences et lignes directrices. Afnor, 2024. Accessible sur : <https://www.boutique.afnor.org/fr> (site payant).

L'INGÉNIERIE DE SÉCURITÉ INCENDIE : UN OUTIL AU SERVICE DE LA PRÉVENTION

Cet article a pour but de présenter les principes de l'ingénierie de sécurité incendie à travers des cas d'application à des lieux de travail. Dans un premier temps, un rappel est fait sur les méthodes et le déroulement d'une étude d'ingénierie ainsi que sur l'apport de la méthode dans le cadre de l'évaluation du risque, notamment professionnel. La seconde partie de l'article présente deux cas concrets permettant d'illustrer l'ingénierie pour des lieux de travail complexes (des établissements de soin et atypiques (un plateau de cinéma avec effets spéciaux pyrotechniques)).

NICOLAS
TREVISAN
CNPP

En France, la réglementation en matière de sécurité incendie repose principalement sur une approche prescriptive. Cela signifie qu'il existe un ensemble de règles et de normes qui définissent de façon détaillée les mesures de sécurité à mettre en œuvre selon le type d'établissement. Ces prescriptions couvrent des domaines comme le compartimentage, l'évacuation, le désenfumage, ou encore la résistance au feu des structures.

Lorsqu'un bâtiment est conçu et exploité en conformité avec ces règles, on considère qu'il satisfait automatiquement aux objectifs de sécurité associés (par exemple, permettre l'évacuation des personnes, faciliter l'intervention des secours ou encore limiter la propagation du sinistre). Il n'est donc pas nécessaire d'apporter une démonstration supplémentaire de performance : le respect strict de la réglementation fait présomption d'un niveau de sécurité suffisant.

L'approche « performantielle » constitue une alternative (ou un complément) à l'approche prescriptive. Cette approche consiste à démontrer que les objectifs de sécurité sont atteints, non pas parce que les prescriptions sont respectées, mais parce que la performance réelle du système (ou de l'organisation) a été évaluée et jugée suffisante. Cette démonstration peut se faire de différentes manières : par des calculs analytiques simples, par des essais ou encore par des simulations numériques.

L'ingénierie de sécurité incendie (notée ISI) constitue l'application de l'approche performantielle au domaine de la sécurité incendie. Bien que l'on puisse parler d'ingénierie de sécurité incendie de façon générale, incluant tout moyen pour démontrer la performance, en pratique on fait souvent référence à des méthodes de simulation numérique. En France,

le recours à l'ISI est encadré réglementairement et seuls certains domaines l'autorisent, les plus courants étant la résistance au feu et le désenfumage. Le recours à l'ISI s'avère pertinent lorsque les particularités d'un bâtiment ne s'inscrivent pas pleinement dans le cadre réglementaire prescriptif, ou lorsque l'application stricte des règles se heurte à des contraintes architecturales, techniques, patrimoniales ou économiques, comme par exemple dans le cas de certains bâtiments industriels, de bâtiments patrimoniaux classés ou de configurations architecturales innovantes ou atypiques. Une ISI peut également être réalisée pour apporter un avis technique lorsque la performance réelle d'une solution suscite un doute, ou encore dans le cadre d'une démarche volontaire visant à analyser, optimiser ou démontrer plus finement le niveau de sécurité incendie d'un établissement.

Quel que soit le domaine concerné, le processus d'une ISI est sensiblement similaire et est présenté dans la norme NF ISO 23932-1 [1]. De manière simplifiée, l'approche est divisée en trois étapes principales :

- dans un premier temps, il est nécessaire de définir le cadre et les limites de l'analyse. Cela consiste, entre autres, à bien identifier les objectifs de sécurité visés et les exigences fonctionnelles associées ainsi qu'à identifier les critères de performances à évaluer ;
- la deuxième partie consiste à définir les scénarios de dimensionnement qui seront utilisés pour évaluer la performance du système. Cette définition passe par une analyse de risques adaptée aux objectifs identifiés précédemment ;
- enfin, la dernière partie consiste à réaliser l'analyse afin de déterminer si les critères de performance sont remplis ou non.

Application de l'ISI au désenfumage

Dans le cas d'une ISI de désenfumage, l'objectif principal consiste généralement à évaluer si le système de désenfumage mis en place dans un établissement est en mesure de maintenir des conditions de « tenabilité » suffisantes pour permettre, en cas de départ de feu, l'évacuation du public et du personnel, mais également pour faciliter l'intervention des services de secours et pour limiter la propagation du sinistre. Pour cela, différents scénarios sont définis. Ils intègrent non seulement les caractéristiques du foyer et de sa propagation éventuelle, mais aussi l'ensemble des éléments liés à la mise en sécurité de l'établissement. Il s'agit notamment de déterminer :

- le moment où le désenfumage est mis en œuvre ;
- le délai de fermeture des portes coupe-feu ;
- comment est réalisée la détection et à quel moment est diffusée l'alarme d'évacuation ;
- la manière dont l'évacuation des occupants est réalisée (cheminement, temps de réaction, organisation du personnel, etc.).

Ces paramètres permettent de construire des scénarios représentatifs et pénalisants à partir desquels la performance réelle du système de désenfumage pourra être évaluée. L'un des principaux avantages de l'ISI est la possibilité de prendre en compte toutes les particularités d'un établissement alors que la réglementation prescriptive reste générique. L'analyse de risque permet de construire ces scénarios, notamment en identifiant les emplacements des charges calorifiques et les sources d'inflammation possibles. L'objectif est d'identifier des scénarios « enveloppes », volontairement majorants. En testant le système dans les conditions les plus sévères, on garantit que les situations moins critiques seront également couvertes. Même si la probabilité d'occurrence de ces scénarios majorants est faible, ils permettent d'éprouver le système dans ses limites. Il convient cependant de ne retenir que des scénarios raisonnablement envisageables

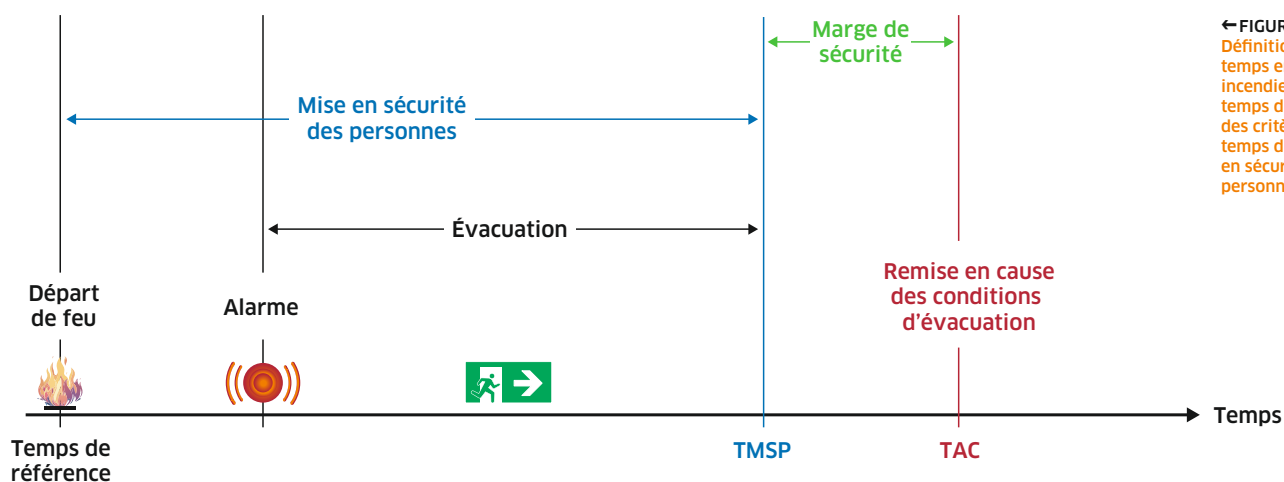
afin d'éviter un surdimensionnement des mesures, voire une impossibilité de définir une solution de mise en sécurité cohérente.

Cette étape de construction des scénarios est réalisée en concertation avec l'ensemble des acteurs du projet. Cette démarche collaborative permet de garantir que le fonctionnement et les spécificités de l'établissement sont bien pris en compte et que les attentes des différentes parties prenantes sont bien intégrées dès les prémices de la démarche. Dans le cadre des études réalisées en établissement recevant du public (ERP), cette étape doit obligatoirement faire l'objet d'une validation par les autorités compétentes afin de s'assurer de la pertinence et de la représentativité des scénarios proposés.

Une fois les scénarios définis et validés, ils sont simulés à l'aide d'un logiciel de mécanique des fluides adapté à la représentation des phénomènes physiques impliqués dans un incendie. Le plus utilisé en France, comme à l'international, est le *Fire Dynamics Simulator* (FDS) [2]. Ce logiciel permet de représenter en 3D le volume concerné et d'y suivre le développement du feu, la propagation des fumées et autres effluents ainsi que les contraintes thermiques qui en résultent.

La méthode d'évaluation de la performance la plus couramment employée consiste à comparer le temps de dégradation des conditions d'évacuation au temps nécessaire à la mise en sécurité des personnes.

La première partie de cette méthode consiste à évaluer à partir de quel instant les conditions deviennent trop dégradées dans les différents locaux pour permettre une évacuation dans de bonnes conditions. Cette évaluation repose sur l'analyse de l'évolution de plusieurs grandeurs clés : la visibilité, la température et le flux thermique radiatif. Des valeurs seuils sont définies pour chacune de ces grandeurs¹. Leur dépassement correspond au temps d'atteinte des critères (noté TAC ; Cf. Figure 1).



← FIGURE 1
Définition des temps en sécurité incendie : temps d'atteinte des critères (TAC), temps de mise en sécurité des personnes (TMSP).



La seconde partie consiste à évaluer le temps de mise en sécurité des personnes (noté TMSP). Celui-ci peut être déterminé par des méthodes analytiques ou par des simulations à l'aide de logiciels spécialisés. Il correspond au temps nécessaire pour que l'ensemble de l'effectif présent dans un établissement puisse être mis à l'abri des conséquences d'un incendie. En pratique, il s'agit le plus souvent d'évaluer le temps nécessaire pour évacuer les locaux concernés. En plus du temps nécessaire au cheminement pour atteindre les différentes issues, ce temps inclut également le délai de détection ainsi que le temps de réaction des personnes. Il s'agit d'une valeur théorique du temps minimal nécessaire à l'évacuation de l'établissement, basée sur une succession d'hypothèses pénalisantes. Ce calcul ne prend pas en compte les comportements humains qui pourraient ralentir cette évacuation. Une solution sera jugée performante si le TAC est supérieur au TMSP. Plus cet écart est important, plus la marge de sécurité est élevée et permet, par exemple, de couvrir des aléas liés aux comportements humains.

Exemple d'utilisation de l'ISI de désenfumage dans un établissement de santé

Le premier exemple de recours à l'ISI concerne le désenfumage des circulations d'un hôpital situé en Île-de-France. Les exigences applicables à ce type d'établissement sont décrites dans le règlement de sécurité incendie des ERP, ainsi que dans l'instruction technique n°246 [3]. Ces textes prescrivent notamment les débits d'extraction des fumées que doivent assurer des installations de désenfumage mécanique installées dans les circulations.

L'établissement étudié présentait un déficit de débit d'extraction dans les circulations de huit niveaux. Face à ce constat, les autorités compétentes demandaient soit une mise en conformité de l'installation de désenfumage, soit la démonstration de la performance de l'installation au moyen d'une ISI. Compte tenu de la complexité technique et économique qu'impliquait une mise en conformité (présence d'amiante, travaux en site occupé), une ISI a été réalisée. L'objectif de l'étude était double :

- comparer la performance de l'installation existante avec une solution réglementaire (approche relative) ;
- vérifier la compatibilité avec la mise en sécurité des patients et du personnel (approche absolue). Cette seconde approche nécessite de prendre en compte les spécificités liées à l'exploitation de ce type d'établissement. En effet, le public présent ne peut, dans une grande majorité, pas évacuer par lui-même. Les règles de mise en sécurité sont donc différentes d'autres types d'ERP, puisqu'elles reposent sur un transfert horizontal des personnes vers d'autres locaux du même niveau.

Ce transfert étant réalisé par le personnel, il est nécessaire d'inclure leur action dans l'analyse et d'évaluer si celle-ci peut être réalisée en sécurité en cas d'incendie.

En suivant la méthodologie générale des études ISI, une analyse préliminaire a été réalisée afin de bien comprendre le contexte, d'identifier les locaux les plus critiques et de recueillir toutes les données nécessaires à l'étude. Cette première étape a permis de poser toutes les hypothèses utiles à la définition des scénarios incendie.

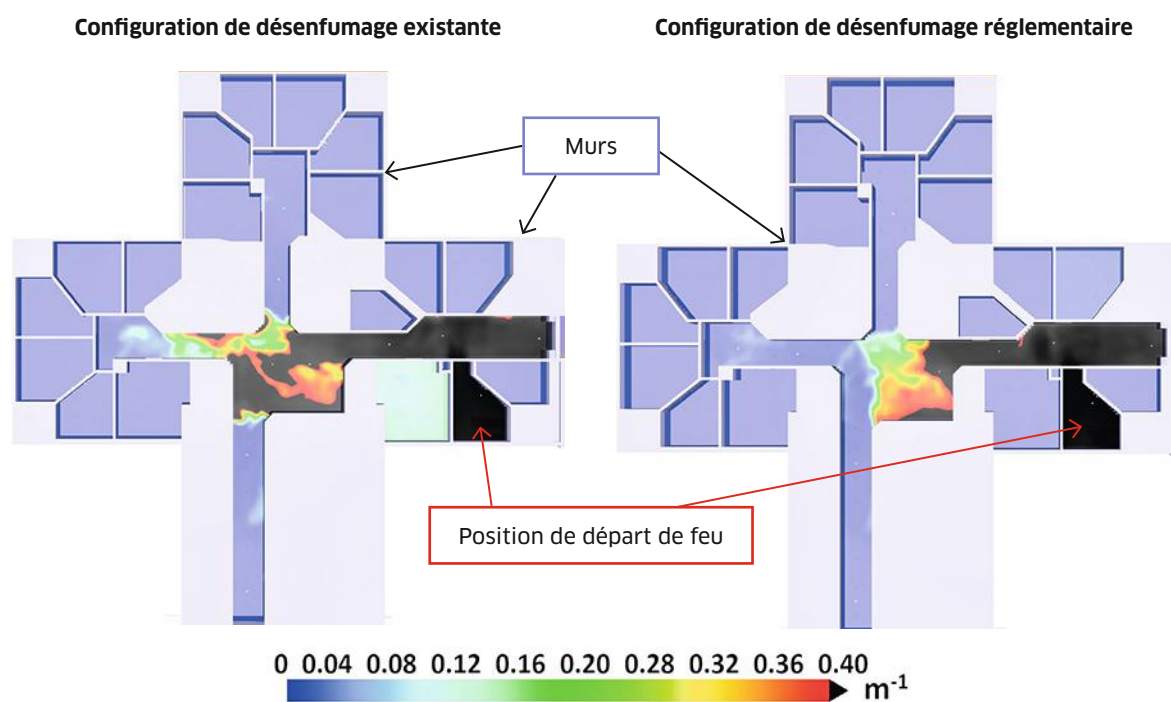
Après avoir bien définis les objectifs, le périmètre et les limites de l'étude, l'analyse de risque réalisée a permis d'identifier les différents scénarios pertinents à simuler afin d'évaluer la performance de l'installation. Ces scénarios étaient :

- un départ de feu dans une chambre avec porte ouverte sur la circulation. Cette configuration est représentative du fonctionnement courant de l'établissement et est considérée comme le scénario le plus réaliste, notamment en considérant l'historique des sinistres récents sur des établissements similaires ;
- un départ de feu dans un local à risque dont la porte est restée ouverte. Ce scénario majorant sert à évaluer la capacité du système à traiter la production d'un grand volume de fumée et de chaleur. Il représente une situation dégradée du fonctionnement de l'établissement, les portes de ce type de local devant normalement rester fermées (présence de ferme-portes). Ce scénario est raisonnablement envisageable car il est souvent constaté des portes maintenues ouvertes en situation réelle d'exploitation ;
- un départ de feu dans une circulation. Ce scénario sert à traiter un cas de figure où un départ de feu de faible puissance (poubelle, chariot...) se produirait et où les fumées se propageraient directement dans la circulation.

Conformément à la démarche administrative prévue pour la réalisation d'études ISI en ERP, les scénarios ont été soumis aux autorités compétentes pour validation avant de pouvoir être mis en œuvre.

Pour chaque scénario, deux simulations ont été réalisées. La première considérait les caractéristiques du système de désenfumage en place. La seconde prenait en compte des débits d'extraction de fumées conformes à la réglementation applicable.

Les résultats obtenus ont montré que, quel que soit le scénario considéré, les conditions d'évacuation se dégradent très rapidement dans les circulations (Cf. Figure 2). Cette dégradation se traduit par une perte de visibilité liée à la présence de fumées ainsi qu'une augmentation de la température au-delà d'un critère seuil défini à 40°C. Cette dégradation rapide n'était pas compatible avec les



↑ FIGURE 2 Comparaison des conditions de visibilité à 2 m du sol dans deux configurations de désenfumage, cinq minutes après un départ de feu dans une chambre. Les zones noires correspondent à une visibilité réduite (coefficient d'extinction COE < 0,4 m⁻¹).

délais nécessaires pour que le personnel réalise la mise en sécurité des patients, les exposant ainsi tous à un risque important.

Les résultats ont également montré qu'une mise en conformité de l'installation pouvait améliorer légèrement les performances, sans pour autant permettre d'atteindre un niveau compatible avec le transfert horizontal des patients. Il a ainsi été démontré que l'amélioration du niveau de sécurité nécessaire ne pouvait reposer uniquement sur la mise en conformité du système de désenfumage. Des simulations complémentaires ont donc été réalisées afin d'évaluer d'autres solutions visant à améliorer les résultats.

Sur la base des conclusions de l'étude, l'établissement a finalement opté pour la création de recouvrements supplémentaires dans les circulations, permettant d'empêcher la propagation rapide des fumées dans tout le niveau. Il a également été acté de mettre en place des ferme-portes débrayables au niveau des chambres, offrant à la fois la souplesse nécessaire au travail du personnel de santé et le respect de l'intimité des patients, tout en garantissant une mise en sécurité efficace en cas de sinistre. La stratégie de mise en sécurité a été également adaptée en favorisant, lorsque cela est nécessaire et adapté, le confinement des patients dans les chambres au lieu de systématiser leur transfert horizontal.

Enfin, les résultats de simulation et notamment les

animations de propagation des fumées ont également servi à des actions de formation et de sensibilisation du personnel au risque incendie dans l'établissement.

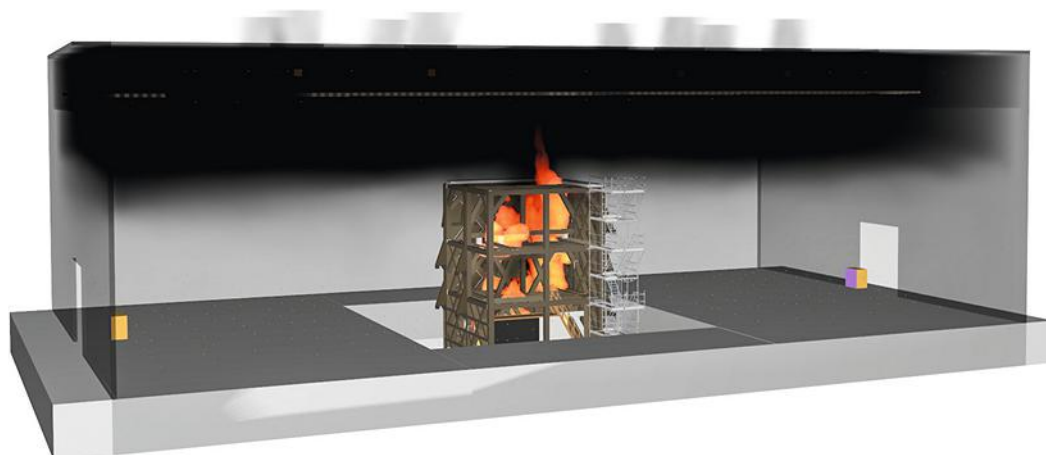
Exemple d'utilisation de l'ISI de désenfumage dans un lieu de travail atypique

Le second exemple concerne un cas particulier de recours à l'ISI où le bâtiment ne présente pas de non-conformité par rapport à la réglementation, mais où une activité exceptionnelle est susceptible de présenter un risque pour le personnel.

Lors du tournage du film « Notre-Dame brûle », Jean-Jacques Annaud a souhaité limiter au maximum le recours aux effets spéciaux numériques pour les scènes incluant du feu. Il a donc eu recours à des effets pyrotechniques lors du tournage de certaines scènes. L'une de ces scènes concerne la progression des pompiers de la Brigade des sapeurs-pompiers de Paris dans le beffroi en flammes. Pour cela, une partie du beffroi a été reconstituée à l'échelle 1:1 dans un studio de la Cité du cinéma. Cette réplique, de 13 m de haut avec une base carrée de 9 m de côté, était équipée de 120 m de rampes de gaz permettant de générer des séquences de flammes au gré des besoins. L'utilisation simultanée de la totalité des rampes était en mesure de générer un foyer de plus de 40 MW, soit l'équivalent d'un feu de poids lourd.

Une étude ISI a été réalisée (Cf. Figure 3) afin de





© CNPP

↑ FIGURE 3 Vue 3D d'un résultat de simulation. Visualisation du volume de flamme formé par les rampes de gaz ainsi que de la stratification et de l'évacuation des fumées dans le studio.

vérifier que ces mises à feu ne présentaient pas de risques pour le personnel présent sur le plateau pendant les scènes (techniciens, cadres, machinistes, acteurs, etc.) ainsi que pour les équipements et structures du bâtiment.

Les mesures destinées à assurer la sécurité incendie sont souvent perçues comme des contraintes pesant sur l'exploitation d'un établissement. Dans le cadre d'un tournage de cinéma, elles peuvent notamment se traduire par une réduction du nombre de prises réalisables chaque jour, entraînant une augmentation de la durée du tournage et une hausse significative des coûts de production. L'un des objectifs de l'étude consistait donc à définir une chronologie optimisée des cycles de mise à feu et des périodes de refroidissement, afin de garantir la sécurité des personnes et des biens, aussi bien durant les scènes qu'entre celles-ci, tout au long de la journée de tournage.

Les résultats ont montré qu'une phase de brûlage de cinq minutes, suivie d'une pause de 10 minutes, suffisaient à garantir la sécurité des personnes et des équipements durant les scènes, tout en assurant le renouvellement de l'air (notamment pour limiter l'exposition des salariés au CO et CO₂) et le refroidissement des éléments de structure entre deux prises. Cette chronologie se révélait par ailleurs compatible avec les exigences et les rythmes de production. Il a également été préconisé de réaliser une pause plus longue au cours de la journée afin de permettre aux éléments de structure les plus massifs de refroidir suffisamment, certains pouvant atteindre près de 200 °C au cœur après plusieurs heures de tournage. Enfin, l'analyse des contraintes thermiques au niveau des équipements situés en partie haute du volume a permis de mettre en évidence un risque de dégradation et de préconiser l'ajout de protections thermiques (plaques de plâtre ou couvertures) afin de les protéger.

L'étude ISI a ainsi permis de définir une organisation de tournage à la fois sécurisée et compatible avec les impératifs de production.

Conclusion

L'ingénierie de sécurité incendie constitue une approche performancielle complémentaire à une réglementation prescriptive, notamment lorsque les situations sont complexes ou atypiques. En s'appuyant sur des simulations numériques de scénarios incendie représentatifs, elle permet d'évaluer de manière objective la performance réelle des mesures de prévention mises en œuvre et d'adapter les solutions aux risques et aux contraintes spécifiques des établissements. ●

1. Les critères utilisés pour quantifier la performance sont généralement tirés du « Guide de bonnes pratiques pour les études d'ingénierie du désenfumage » [4]. D'autres critères peuvent être utilisés, en fonction des objectifs de l'étude.

BIBLIOGRAPHIE

[1] NORME NF ISO 23932-1 – Ingénierie de la sécurité incendie - Principes généraux. Partie 1 - Généralités. Afnor, 2019. Accessible sur : <https://www.boutique.afnor.org/fr> (site payant).

[2] FDS-SMV – Fire dynamics simulator. Accessible sur : <https://pages.nist.gov/fds-smv/> (consulté en nov. 2025).

[3] INSTRUCTION TECHNIQUE MINISTÉRIELLE N° 246, relative au désenfumage des établissements recevant du public (ERP) du 25 juin 1980. Accessible sur : <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000000436811> (Cf. Annexe III de l'arrêté du 22 mars 2004).

[4] LABORATOIRE CENTRAL DE LA PRÉFECTURE DE POLICE – Guide de bonnes pratiques pour les études d'ingénierie du désenfumage. 2017. Accessible sur : <https://www.prefecturedepolice.interieur.gouv.fr>

Participez à la recherche



Organisation de la maintenance et prévention

→ Visio-assistance d'un personnel sur place par un expert de maintenance à distance : quelles pratiques ?

Votre entreprise...

- propose un service d'assistance à distance à des entreprises clientes ou sous-traitantes, grâce à un système de visio-assistance, pour la réalisation d'activités de maintenance d'équipements de travail, de machines ou d'installations, que vous concevez, produisez, louez ou maintenez ;
- et/ou utilise un système de visio-assistance, permettant à vos salariés d'être assistés à distance, par un expert de maintenance interne ou extérieur à votre entreprise, dans la réalisation d'activités de maintenance sur vos équipements de travail, machines ou installations.

L'INRS a besoin de vous

L'INRS souhaite mieux connaître les pratiques de visio-assistance d'un personnel sur place par un expert de maintenance à distance, ainsi que les organisations du travail associées, afin de proposer des pistes de prévention adaptées à ces situations de travail.

> Comment se déroulera l'étude ?

Dans un premier temps, l'équipe de l'INRS (deux à trois personnes) cherchera à identifier les motivations ayant conduit à mettre en place de telles situations d'assistance, les fonctionnalités des systèmes de visio-assistance utilisés, l'organisation du travail instaurée et les avantages et inconvénients éventuels perçus. Pour cela, des entretiens seront menés avec les différentes parties prenantes : responsables, coordinateurs et techniciens de maintenance, personnels de production, etc.

Dans un second temps, des observations de ces situations d'assistance et des activités des personnels impliqués seront réalisées. À l'issue de ces situations d'assistance, des débriefings seront effectués avec les salariés concernés, autant que possible à leur poste de travail. Les activités de travail habituelles des différents personnels ne seront pas modifiées.

Les données recueillies seront anonymisées et les résultats, traités collectivement, feront l'objet d'une restitution aux entreprises partenaires (diagnostic de la situation, proposition de pistes de prévention).



Vous souhaitez participer ?

Contactez Corinne Grusenmeyer : 03 83 50 21 66

corinne.grusenmeyer@inrs.fr

INRS, département Sciences appliquées
au travail et aux organisations

1, rue du Morvan, CS 60027, 54519 Vandœuvre-lès-Nancy Cedex



Études & solutions

Notes techniques

Enjeu et déploiement d'une stratégie de mesures
des retardateurs de flamme en milieu professionnel :
filère du traitement des DEEE

P. 63

Proposition de classification de la pulvérulence
des poudres par la méthode de l'agitateur Vortex

P. 72

Étude de cas

Débit d'air extrait sur les chantiers
de désamiantage: comment le mesurer?

P. 80

Base de données Colchic

Portrait rétrospectif des expositions professionnelles
dans les fonderies de 2015 à 2024

P. 88

Notes techniques

ENJEU ET DÉPLOIEMENT D'UNE STRATÉGIE DE MESURES DES RETARDATEURS DE FLAMME EN MILIEU PROFESSIONNEL

Filière du traitement des déchets d'équipements électriques et électroniques

Les retardateurs de flamme (RF) présents dans la filière des déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE) peuvent être à l'origine d'expositions des opérateurs par inhalation, contact cutané et ingestion indirecte. Cet article présente les enjeux de la filière et la stratégie de mesure multivoie (air, poussières, surfaces, peau, urine) mise en œuvre dans le cadre d'une activité de recherche et développement. Il décrit son déploiement au cours de campagnes de mesure menées en entreprise et en livre les premiers enseignements.

FRANÇOIS
ZIMMERMANN,
MARIE
LECLER,
JULIETTE
KUNZ-IFFLI,
ESTHER
MONNOYER,
PHILIPPE
DUQUENNE
INRS,
département
Ingénierie
des procédés

WILLIAMS
ESTÈVE
INRS,
département
Métrologie
des polluants

GUILLAUME
ANTOINE,
BANINIA
HABCHI,
NATHALIE
GROVA
INRS,
département
Toxicologie et
biométrie

Contexte général

Les retardateurs de flamme (RF) sont des substances chimiques de synthèse incorporées aux matériaux combustibles afin de réduire leur inflammabilité, de prévenir l'ignition et de ralentir la propagation d'un incendie. Ils regroupent aujourd'hui plusieurs centaines de molécules. Leur efficacité a conduit à leur intégration massive dans les textiles, mousses, matériaux de construction et polymères des équipements électriques et électroniques. L'utilisation de produits ignifuges incorporés aux matériaux depuis de nombreuses années entraîne, à long terme, une augmentation de la charge corporelle en RF, aussi bien chez les travailleurs exposés que dans la population générale [1]. Un certain nombre d'études scientifiques ont mis en évidence leurs effets délétères sur la santé humaine [2,3,4].

Le cadre réglementaire européen a progressivement restreint l'usage des RF bromés. Certains ont été identifiés comme perturbateurs endocriniens, bioaccumulables et toxiques ou encore comme polluants organiques persistants (POP) au titre du règlement UE 2019/1021. Dès 2003, la directive 2003/11/CE invite les états à interdire la commercialisation de deux polybromodiphényléther (penta- et octa-BDE) dans les produits destinés au grand public. Depuis, d'autres substances ont été ajoutées à la liste des

substances soumises à restriction dans le cadre du règlement Reach (*Registration, evaluation, authorisation and restriction of chemicals*) ou identifiées comme substances extrêmement préoccupantes (SVHC) par l'Agence européenne des produits chimiques (ECHA)¹. En complément, la directive-cadre sur les déchets (2008/98/CE) et la directive relative aux déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE : 2012/19/UE) imposent aux États membres de mieux gérer les substances dangereuses dans les flux de déchets, en particulier ceux issus des équipements électriques et électroniques en fin de vie. Compte tenu de ces évolutions réglementaires, les RF bromés sont progressivement remplacés par des RF dits émergents tels que les RF phosphorés.

Cependant, les RF bromés restent largement présents dans les DEEE, tandis que les RF phosphorés y sont maintenant fréquemment détectés. La présence de ces deux classes de RF soulève des enjeux sanitaires pour toute la filière des DEEE, et en particulier pour les opérateurs de traitement. En effet, les RF bromés et organophosphorés sont des composés organiques semi-volatils. Ces substances peuvent être émises dans l'atmosphère ambiante des lieux de travail sous forme gazeuse et particulaire, s'adsorber sur les poussières et les surfaces, se déposer et contaminer l'environnement professionnel. Elles peuvent exposer les



RÉSUMÉ

Les retardateurs de flamme (RF) sont couramment utilisés dans de nombreux secteurs industriels pour réduire l'inflammabilité des matériaux. Cependant, leur présence dans l'environnement de travail pose des problèmes sanitaires en raison de leur bioaccumulation et de leur potentielle toxicité. Certains de ces composés sont des perturbateurs endocriniens. Cet article expose les enjeux opérationnels de la filière et propose une stratégie intégrée de déploiement d'outils de mesure des niveaux d'exposition et d'émissivité des RF dans les entreprises. Cette stratégie s'appuie sur une combinaison de plusieurs approches complémentaires, incluant des prélèvements atmosphériques individuels et d'ambiance, des prélèvements surfaciques et granulométriques pour l'analyse de la taille des particules, ainsi que des prélèvements individuels sur la peau et des prélèvements urinaires à visée biométriologique. Ce protocole de mesure a été mis en œuvre dans plusieurs entreprises de traitement des déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE), à la suite d'une enquête menée au sein de la filière. Les résultats préliminaires issus de deux campagnes de mesures dans des entreprises pilotes sont présentés de manière synthétique, afin d'illustrer la faisabilité de la méthodologie proposée et de mettre en évidence les premières tendances observées.

CONCERNS WITH AND DEPLOYMENT OF A STRATEGY TO MEASURE FLAME RETARDANTS IN AN OCCUPATIONAL SETTING

Flame retardants (FR) are commonly used in a number of industrial sectors to reduce the flammability of materials. However, their presence in the occupational environment presents health risks due to their bioaccumulation and their potential toxicity, including as endocrine disruptors for some. This article sets out the operational concerns around the use of FR and proposes an integrated strategy deploying tools to measure exposure levels and emissions in companies. This strategy relies on a combination of several complementary approaches: personal and ambient atmospheric sampling, surface sampling and granulometry to analyse particle size, alongside biometry monitoring based on analysis of skin swabs and urine samples. This measurement protocol has been implemented in several companies treating waste from electrical and electronic equipment (WEEE), following a survey undertaken in the branch. The preliminary results of two measurement campaigns in pilot companies are briefly presented to illustrate the feasibility of the proposed methodology and to report the general trends observed.

travailleurs par diverses voies : inhalation d'aérosol gaz – solide, ingestion de poussières contaminées ou encore pénétration à travers la peau [5].

Cette multiplicité des modes d'exposition, la diversité des RF ainsi que leur niveau de concentration relativement faible rendent leur surveillance complexe à réaliser. Malgré les risques avérés, très peu de RF

font aujourd'hui l'objet de valeurs limites d'exposition professionnelle (VLEP). Les VLEP qui existent pour certains RF organophosphorés sont le plus souvent anciennes (établies dans les années 1980), et reposent sur des critères toxicologiques dépassés, ne prenant pas en compte les effets à faibles doses, en particulier ceux associés aux propriétés de perturbation endocrinienne.

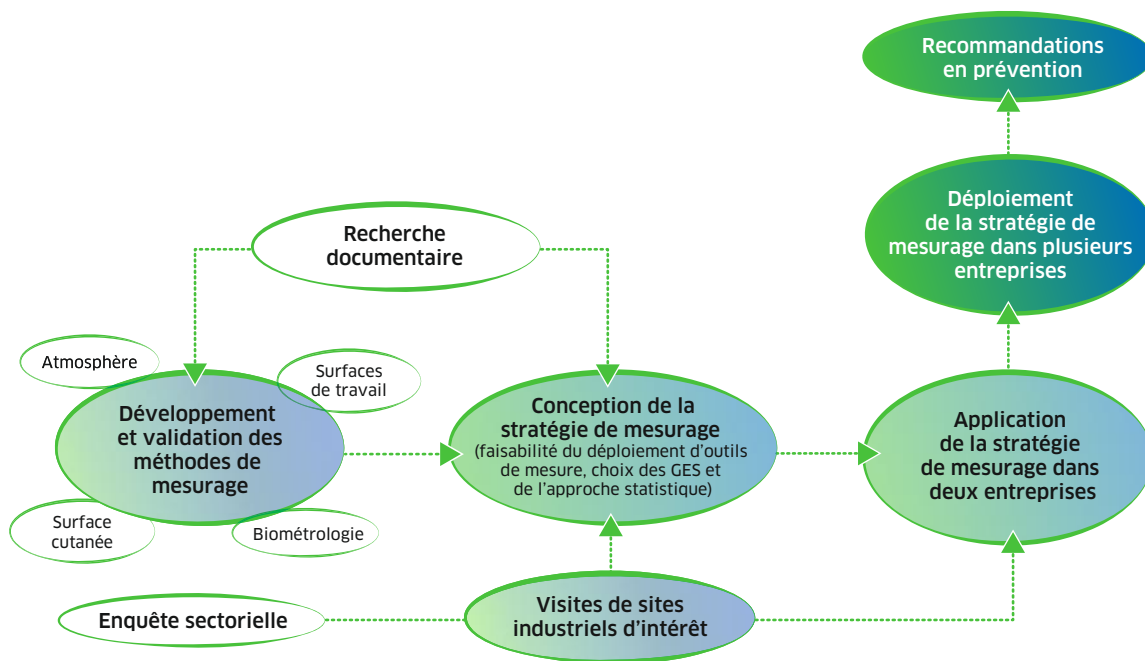
La métrologie de l'exposition professionnelle aux RF a fait l'objet d'avancées notables dans le développement de méthodes analytiques en chromatographie en phase gazeuse couplée à la spectrométrie de masse en tandem (GC-MS/MS) et en chromatographie en phase liquide couplée à la spectrométrie de masse en tandem (LC-MS/MS) [6,7]. L'INRS a récemment développé et validé deux méthodes de prélèvement et d'analyse, désormais disponibles dans les fiches MétroPol M-457 (organophosphorés) et M-458 (composés polybromés)².

L'objectif de cet article est de présenter une stratégie de déploiement des outils de mesures des RF en entreprise, en s'appuyant sur l'étude de la filière du recyclage des DEEE. Il met en perspective le contexte et les enjeux de la filière au regard des exigences de surveillance de ces substances. Il décrit ensuite la méthodologie retenue pour sélectionner les sites industriels pilotes et définir les choix métrologiques et biométriologiques, ces derniers reposant sur l'analyse de biomarqueurs biologiques d'exposition ou d'effet. La méthodologie proposée est une stratégie de mesure multivoie (air : vapeurs/particules et granulométrie, surfaces, peau et biométriologie urinaire) visant à mieux caractériser l'exposition aux RF. Enfin, les résultats préliminaires issus des campagnes de mesures menées au sein des deux premières entreprises étudiées dans la filière DEEE sont présentés de manière synthétique afin d'illustrer la faisabilité du déploiement sur site de la stratégie de mesure développée et sa pertinence dans un contexte de prévention. Cette démarche est volontairement exploratoire : elle visera *in fine* à relier les compartiments d'exposition et à construire une lecture plus cohérente des mécanismes d'exposition (émission – dépôt – remise en suspension – transfert main/surface – absorption).

Contexte sectoriel et enjeux opérationnels

Les RF, bien que toxiques et réglementés, sont encore très présents dans de nombreuses catégories de DEEE. Les centres de traitement doivent gérer ces flux de matériaux contenant des RF tout en garantissant la sécurité des opérateurs. C'est pourquoi le secteur du traitement des DEEE requiert une vigilance particulière. Au cours des dernières années, l'INRS a d'ailleurs diffusé de nombreux messages de prévention à destination de cette filière (Cf. *Pour en savoir plus*).

La principale source de RF dans les DEEE provient des plastiques additivés composant les équipements. La quantité de plastiques générée par les DEEE est



← FIGURE 1
Schéma de la stratégie de métrologie mise en place dans la filière de traitement des DEEE. En vert / bleu foncé : les étapes qui seront déployées ultérieurement.

© Valérie Causse / INRS / 2025

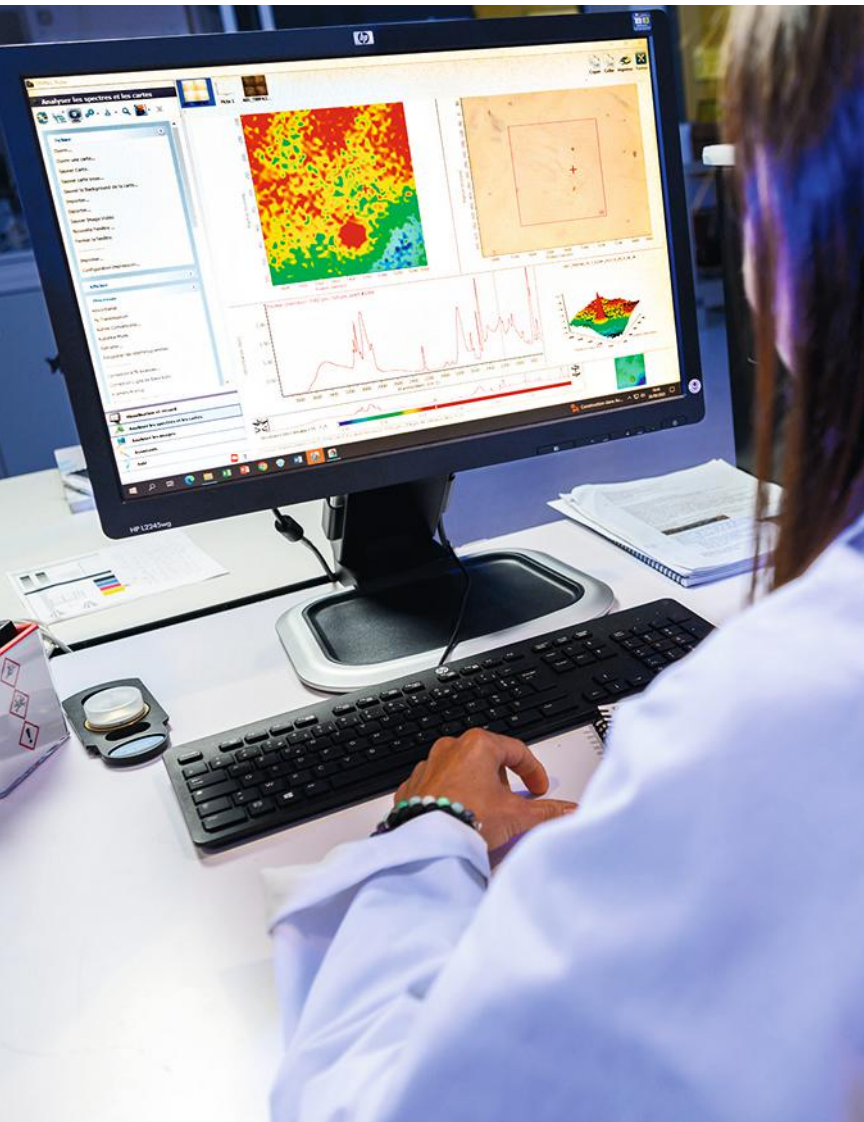
proche de 300 000 t/an. Depuis décembre 2025, le seuil de séparation des plastiques bromés est fixé à 350 ppm (somme des cinq RF bromés classés POP : tétra-, penta-, hexa-, hepta- et déca-BDE). Un nouvel abaissement de ce seuil à 200 ppm est prévu en décembre 2027. Les plastiques bromés sont soit envoyés vers des filières d'élimination pour la part considérée comme déchets dangereux (ex. : le flux écrans à tubes cathodiques), soit éliminés thermiquement pour les plastiques considérés non dangereux mais non éligibles au recyclage (ex. : le flux des écrans plats et des petits appareils en mélange – PAM). Ceci renforce la nécessité de mieux caractériser les matériaux afin de permettre un tri sélectif de plus en plus affiné entre les fractions à éliminer et celles à valoriser. En complément, les exigences réglementaires de la loi « Agec » (anti-gaspillage pour une économie circulaire) ont introduit des « critères de performance environnementale », parmi lesquels l'absence de RF dans les matériaux (taux de RF bromés tolérés inférieurs à 0,01 % du matériau). Les éco-organismes peuvent ainsi attribuer des primes ou des pénalités aux entreprises en fonction de l'atteinte de ces performances. La nécessité de l'identification, de la caractérisation et de la quantification des RF devient alors un enjeu réglementaire de performance de valorisation matière. Les centres de traitement des DEEE doivent ainsi mettre en place des techniques de tri de plus en plus strictes, sûres et performantes en fonction des tendances à la baisse des seuils de tolérance en RF. Les industriels doivent aussi avoir recours à des caractérisations des matériaux plus précises pour savoir si le recyclage est possible, si le tri est efficace et si une partie des flux doit être considérée comme déchets dangereux.

Les entreprises, les laboratoires de mesure et d'analyse ainsi que les organismes de contrôle et de prévention ont donc intérêt, dans une démarche proactive, à maîtriser le mesurage de ces composés.

En résumé, afin de répondre à des enjeux à la fois sanitaires, réglementaires et économiques, les filières professionnelles, les services publics et les acteurs de la prévention ont besoin d'outils de mesure pour caractériser les RF. Du point de vue de l'exposition des travailleurs, toutes les voies de pénétration sont à prendre en considération. Les RF peuvent être inhalés sous forme gazeuse ou particulaire, déposés sur les surfaces et transférés par contact cutané, voire absorbés oralement *via* le contact main-bouche [8]. Il est donc essentiel de mettre en œuvre des stratégies d'évaluation multivoie pour caractériser correctement les expositions.

Cet article présente la conception et la validation d'une stratégie de mesure de l'exposition professionnelle intégrant plusieurs approches de mesurage, telles que les mesures atmosphériques, de surfaces, et sur la peau (surfaces cutanées). La biométrie permet, quant à elle, d'évaluer l'imprégnation résultant de l'ensemble de ces voies potentielles. Celle-ci permet également, au-delà des expositions au travail, de tenir compte des expositions environnementales, notamment en milieux intérieurs, ainsi que *via* l'alimentation. La démarche employée pour définir la stratégie de mesure, détaillée dans la Figure 1, est fondée sur la réalisation conjointe d'une enquête de filière, du développement de méthodes de mesurage, de visites sur site et de campagnes de mesures pilotes visant à valider la méthodologie de mesures. La stratégie de mesure est destinée, ultérieurement, à être déployée





© Gaël Kerbaol / INRS / 2023

Étude de l'INRS sur les expositions aux RF dans la filière des DEEE.

dans une série de campagnes de mesures de plus grande envergure visant à collecter des informations sur les expositions et à proposer des actions en prévention si nécessaire.

Présentation de la stratégie de mesures dans la filière DEEE

Apport de l'enquête de filière et sélection des sites industriels pilotes

Un recensement des entreprises de la filière des DEEE a été réalisé en croisant les données de référencement de différents organismes: éco-organismes, Ademe, Fédération professionnelle des entreprises du recyclage.

Une enquête en trois étapes a ensuite été menée au sein de cette filière :

- envoi d'un questionnaire à 100 entreprises de traitement dont les salariés étaient susceptibles d'être exposés aux RF (taux de retour du questionnaire complet : 40 %) ;
- présélection de 15 entreprises sur la base des

catégories de DEEE traités, des flux et des effectifs pour des visites de sites industriels et pour une collecte de données plus précises sur les activités ;

- choix de 7 sites industriels de traitement, représentatifs du secteur, parmi les 15 entreprises identifiées pour constituer un échantillonnage de données d'exposition représentatives.

L'analyse de l'enquête de filière ne sera pas détaillée ici. On notera simplement que l'enquête a révélé que le risque spécifique d'exposition aux RF demeure largement sous-estimé (50 % des répondants ne considèrent pas les RF dans le risque chimique).

En parallèle, des échanges réguliers avec les acteurs de la filière ainsi que les visites de sites industriels ont été menés afin d'ajuster les outils métrologiques aux réalités du terrain, de répondre au mieux aux attentes des acteurs de la filière, et de valider *in situ* les dispositifs de prélèvements et la méthodologie adoptée.

Présentations des outils de mesures des RF en milieu professionnel

La méthodologie de prélèvements retenue est articulée autour de deux volets complémentaires : un volet de métrologie relatif à l'exposition externe, visant à caractériser les environnements de travail ; et un volet de biométrie visant à évaluer l'imprégnation, associé aux mesures de contamination de surface cutanée. La caractérisation de l'environnement de travail repose sur des prélèvements et des analyses environnementaux incluant des mesures granulométriques des aérosols, des mesures atmosphériques d'ambiance et individuelles, ainsi que des mesures surfaciques sur les plans de travail et les équipements. Ces éléments constituent la base de l'évaluation de l'exposition externe dans le cadre du volet métrologique, pour lequel 20 RF représentant les principales familles de RF bromés et organophosphorés ont été analysés :

- 11 RF bromés : 9 PBDE (dont le décaBDE), le TBBPA et l'HBDC ;
- 9 RF organophosphorés : DPP, TBP, TEP, TCP, TPP, TCPP, TCEP, TEHP, TDCPP³.

L'imprégnation des opérateurs a été évaluée principalement par des prélèvements urinaires, reflétant l'imprégnation corporelle, et complétée par des prélèvements de surface cutanée réalisés par essuyage des mains. Dans ce volet, seuls les RF organophosphorés ont été ciblés en raison de leur utilisation croissante comme substituts des RF bromés dans les équipements électriques et électroniques. Leur présence potentielle dans les plastiques techniques et leur caractère additif favorisent ainsi leur relargage dans les poussières lors des opérations de traitement, rendant leur surveillance pertinente. De plus, la disponibilité de biomarqueurs urinaires validés permet une évaluation fiable de l'imprégnation des opérateurs.

Les analyses des différents prélèvements ont été réalisées à l'aide de méthodes analytiques développées et validées par l'INRS :

- quantification par LC-MS/MS ou GC-MS/MS pour les prélèvements atmosphériques, surfaciques;
- quantification par LC-MS/MS pour les prélèvements urinaires et de surface cutanée.

→ Analyse granulométrique des aérosols

L'intégration de l'analyse granulométrique dans la stratégie de surveillance permet de mieux caractériser la fraction particulaire des RF. Elle contribue ainsi à interpréter les niveaux de contamination atmosphérique et de dépôt sur les surfaces, et à orienter les mesures de prévention collective et individuelle aux spécificités du risque.

La granulométrie des aérosols a été réalisée à l'aide d'impacteurs en cascade Mini-Moudi 135-8 avec 8 étages de classification granulométrique (de 0,18 μm à 10 μm). Les conditions de prélèvement sont un débit d'aspiration contrôlé à 2 L/min et des durées de prélèvement comprises entre 6 et 8 heures (Cf. Figure 2).

→ Prélèvements atmosphériques d'ambiance

Ces prélèvements permettent de mesurer la contamination générale de l'environnement de travail, indépendamment des déplacements individuels, pour évaluer l'influence des émissions des procédés et des opérations unitaires. Aux endroits stratégiques de l'usine (postes de travail, entrées/sorties des procédés, zones de stockage), des points fixes sont équipés d'une pompe et d'un multisupport de prélèvement, de manière à échantillonner les vapeurs et les particules représentatives de la fraction inhalable (< 100 μm ; Cf. Figure 3).

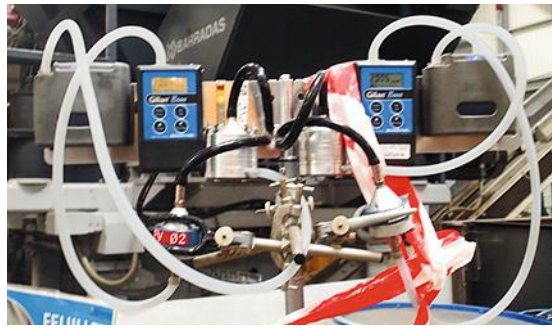
La durée de prélèvement s'étend sur une journée de travail (8 heures) ou sur des périodes représentatives de l'activité. Les prélèvements sont répétés pendant trois jours consécutifs.

→ Prélèvements atmosphériques individuels

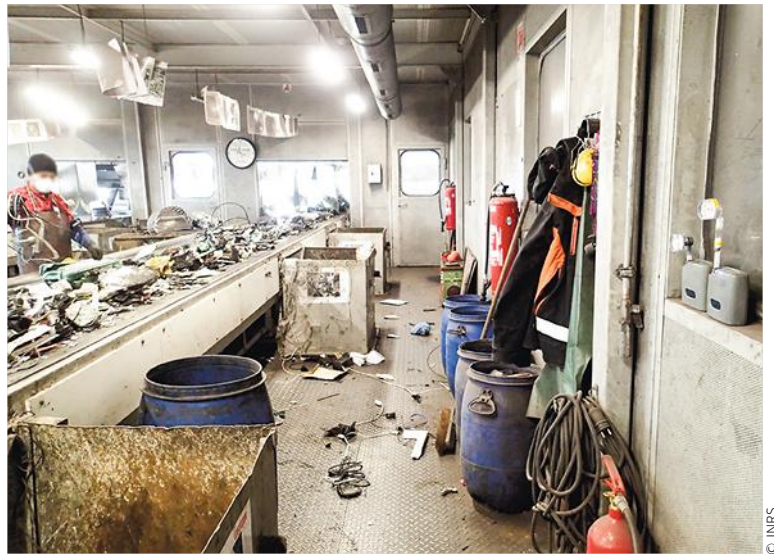
Ces prélèvements permettent d'évaluer l'exposition par inhalation des travailleurs impliqués dans les opérations de traitement des DEEE (démantèlement, tri, broyage, etc), en captant les RF présents sous forme de vapeurs et sous forme particulaire dans l'air au niveau de leurs voies respiratoires. Les salariés sont équipés à leur poste de travail d'une pompe et d'un multisupport de prélèvement placé au niveau des voies respiratoires de manière à échantillonner les vapeurs et les particules représentatives de la fraction inhalable (< 100 μm ; Cf. Figure 4).

La durée de prélèvement s'étend sur une journée de travail (8 heures) ou des périodes représentatives de l'activité entre 4 et 8 heures. Les prélèvements sont répétés pendant trois jours consécutifs.

Les méthodes de prélèvement atmosphériques et d'analyses des RF développées sont disponibles dans les fiches INRS Métropol M-457 (organophosphorés) et M-458 (composés polybromés)⁴.



← FIGURE 2
Système d'analyse granulométrique en fonctionnement in situ.



↑ FIGURE 3 Dispositifs de prélèvements atmosphériques d'ambiance à point fixe dans une cabine de tri des petits appareils en mélange (PAM) (appareils positionnés sur le rebord à droite).



↑ FIGURE 4 Prélèvement atmosphérique individuel : salarié équipé d'un harnais, d'une pompe et d'un support de prélèvement à proximité de ses voies respiratoires (non visible sur la photo) complété par des prélèvements atmosphériques d'ambiance (appareil positionné en haut à gauche au poste de travail).



↑ FIGURE 5
Gabarit de
prélèvement
surfaccique couplé
à un prélèvement
atmosphérique
dans un
laboratoire
in situ d'analyse
des fractions
plastiques.



FIGURE 6 →
Prélèvement
surfaccique en
cours sur un poste
de contrôle.

→ Prélèvements urinaires

La biométrie est un outil de choix pour évaluer l'exposition « réelle », en intégrant toutes les voies d'entrée dans l'organisme (respiratoire, cutanée et orale). Elle prend en compte les facteurs modulant l'imprégnation corporelle, tels que la charge de travail, la durée d'exposition et le port ou non d'équipements de protection individuelle. Les métabolites urinaires des RF organophosphorés ont été rapportés comme étant des biomarqueurs pertinents pour évaluer les expositions aux composés parents. Dans ce cadre, des travailleurs des ateliers considérés comme exposés, ainsi que des salariés travaillant dans des bureaux considérés comme non exposés ont fourni des échantillons d'urine à trois moments clés : en début de poste, en fin de poste (recueilli 2 à 5 heures après la fin de poste), et au réveil le lendemain matin. Ce protocole a été répété pendant trois jours consécutifs.

Résultats préliminaires

L'implication de la filière de traitement des DEEE, en particulier des éco-organismes et des entreprises pilotes, a permis de tester la faisabilité opérationnelle du déploiement de ces outils métrologiques lors de premières campagnes de mesure. Sur le plan opérationnel, la stratégie retenue pour le déploiement conjoint des outils s'est avérée faisable dans le cadre d'une activité de recherche et développement (elle n'est pas facilement transposable à des contrôles de routine).

Les données préliminaires recueillies dans deux entreprises de traitement des DEEE donnent de premières indications, mais l'exploitation croisée des différentes séries de mesures réalisées et à venir reste à effectuer pour en tirer des implications opérationnelles robustes en prévention.

Les concentrations atmosphériques de RF atteignent plusieurs centaines de ng/m^3 , avec des maxima qui approchent le $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (bromés : déca-BDE: $989 \text{ ng}/\text{m}^3$; organophosphorés : TPP $837 \text{ ng}/\text{m}^3$). Tous les RF sont présents à la fois dans la phase vapeur et dans la phase particulaire, cette dernière étant majoritaire. Les aérosols sont composés de particules de toutes tailles, mais les fractions les plus fines, bien que représentant une masse plus faible, possèdent les concentrations massiques en RF les plus élevées. Le diamètre aérodynamique massique médian des poussières est de l'ordre de $7 \mu\text{m}$ à $8 \mu\text{m}$, avec une part significative de particules alvéolaires, préoccupantes pour la santé respiratoire. Les mesures montrent que les surfaces de travail sont contaminées par des RF, à des niveaux variables : quelques dizaines à plusieurs centaines de ng/dm^2 , avec des pics atteignant une dizaine de $\mu\text{g}/\text{dm}^2$ (bromés : déca-BDE $3565 \text{ ng}/\text{dm}^2$; somme des organophosphorés : $10945 \text{ ng}/\text{dm}^2$). La contamination des surfaces cutanées aux RF

→ Prélèvements surfacciques

L'évaluation de la contamination des surfaces de travail permet d'identifier les sources potentielles de transfert cutané et l'état de la contamination [9] par les RF en lien avec la sédimentation des particules atmosphériques (Cf. Figures 5 et 6). Ces prélèvements ont été réalisés à l'aide de lingettes imprégnées d'eau, soit en cours de poste, soit en début et fin de poste pour estimer le dépôt sur les surfaces au cours du temps.

→ Prélèvements de surface cutanée

Les prélèvements sur la main dominante des travailleurs ont été réalisés à l'aide de lingettes imprégnées d'eau, en début de poste, avant les pauses et en fin de poste, pendant trois jours consécutifs, afin d'estimer la contamination cutanée par les RF organophosphorés [10, 11] (Cf. Figure 7).

organophosphorés est généralisée, avec des concentrations maximales pouvant atteindre des niveaux de l'ordre du $\mu\text{g}/\text{main}$. Ces résultats soulignent l'importance du contact main-surfaces comme voie privilégiée d'exposition à ces substances. Par ailleurs, concernant la biométrie urinaire, les métabolites urinaires des RFOP analysés présentaient des fréquences de détection élevées, compris entre 18 % et 99 % selon les composés recherchés.

Les résultats issus des sept campagnes de mesure en cours et l'analyse conjointe des données devraient permettre de confirmer ces résultats préliminaires, de mieux appréhender les mécanismes d'exposition et les facteurs de risque et de proposer des mesures de prévention adaptées.

Conclusion et perspectives

Bilan général

L'intérêt de la stratégie multivoie est de dépasser les limites d'une évaluation « monomatrice » (souvent l'atmosphérique) en documentant simultanément air, dépôts surfaciques, contamination cutanée et indicateurs biologiques. Cette complémentarité permettra d'affiner l'interprétation : une faible concentration atmosphérique pourrait coexister avec des transferts surface – peau importants, et conduire à des leviers de prévention différents. En croisant contamination externe et marqueurs internes, l'approche multivoie peut renforcer l'argumentaire et les orientations de prévention, là où une mesure unique peut sous-estimer



← FIGURE 7
Prélèvement
de surface cutanée
sur la main
dominante
d'un travailleur.

des voies majeures. À ce stade, les premiers résultats sont des tendances issues de la démarche exploratoire, à consolider sur un plus grand nombre de situations. La tendance observée dans les deux premières entreprises montre que l'ensemble des matrices analysées présente une cohérence globale et met en évidence la présence récurrente de RF dans les environnements de travail. Des RF bromés et organophosphorés sont détectés dans toutes les unités investiguées, bien que les niveaux d'exposition varient selon les activités,

POUR EN SAVOIR +

- LECLER M., ZIMMERMANN F., SILVENTE E. – Les retardateurs de flamme dans les filières de traitement des DEEE. In : Dossier : Polyexpositions chimiques massives et diffuses : une réalité méconnue. *Hygiène & sécurité du travail*, 2020, 261, DO 31, pp. 34-41. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=DO%2031>
- INRS – *Recyclage des DEEE. J'adopte les bons gestes.* Film d'animation, Anim-106, 2017. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=Anim-106>
- LECLER M., ZIMMERMANN F., ET AL. – La démarche de prévention du risque chimique dans le secteur des DEEE : les filières historiques et émergentes. In : Dossier : Intégrer la prévention des risques professionnels dans la gestion des déchets. *Hygiène & sécurité du travail*, 2019, 257, DO 27, pp. 37-44. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=DO%2027>
- INRS – *Recyclage DEEE.* Dépliant ED 6285, 2016. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%206285>
- INRS – *Recyclage DEEE. Déchets d'équipements électriques et électroniques. J'adopte les bons gestes.* Affiches A 803, A 804, A 805, A 806, 2016. Accessibles sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=A%20806>
- INRS – *La filière des écrans plats. Aide au repérage des risques dans les entreprises de collecte et de traitement.* Brochure ED 6272, 2016. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%206272>
- INRS – *La filière des DEEE hors lampes. Aide au repérage des risques dans les entreprises de collecte et de traitement des écrans à tube cathodique.* Brochure ED 6133, 2012. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%206133>
- INRS – *Les écrans à tubes cathodiques : comment réduire le risque chimique.* Dépliant ED 6089, 2011. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%206089>
- INRS – *Les appareils de protection respiratoire : choix et utilisation.* Brochure ED 6106, 2020. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%206106>
- INRS – *Les appareils de protection respiratoire.* Fiche ED 98, 2019. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%2098>
- INRS – *Les perturbateurs endocriniens.* Dépliant ED 6377, 2025. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%206377>
- RICAUD M. ET AL. – Dossier : les perturbateurs endocriniens en entreprise. *Hygiène & sécurité du travail*, 2023, 271, DO 40, pp. 16-52. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=DO%2040>



les postes, les individus et les journées. Leur détection systématique dans l'air, sur les surfaces, dans les poussières, sur la peau et dans les urines suggère une contamination généralisée des environnements de travail et une potentielle exposition multivoie (inhalation, contact cutané, ingestion indirecte). Toutefois, les premières données ne permettent pas de conclure à un risque sanitaire chiffré, notamment en raison de l'absence de valeurs de référence. Néanmoins, la nature des substances identifiées, connues pour certaines comme étant des perturbateurs endocriniens ou cancérigènes, et leur coprésence à faibles doses soulignent la nécessité d'actions de prévention, notamment au regard des effets cocktails potentiels. L'approche méthodologique déployée, fondée sur une combinaison de prélèvements métrologiques, permet de constituer un corpus de données plus cohérent pour documenter l'exposition professionnelle. L'ensemble des données reste toutefois à exploiter et à corréliser plus finement, afin de consolider l'interprétation des déterminants d'exposition.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] QADEER A. ET AL. – Global environmental and toxicological impacts of polybrominated diphenyl ethers versus organophosphate esters: a comparative analysis and regrettable substitution dilemma. *Journal of hazardous materials*, 2024, 466, 3.
- [2] JUAREZ M.N. ET AL. – Exposure to brominated flame retardants in utero and through lactation delays the development of DMBA-induced mammary cancer: potential effects on subtypes? *Frontiers in endocrinology*, 2024, 15.
- [3] MOREL C. ET AL. – Brominated flame retardants, a cornelian dilemma. *Environmental chemistry letters*, 2023, 21, pp. 9-14.
- [4] CANBAZ D. ET AL. – Immunotoxicity of organophosphate flame retardants TPHP and TDCIPP on murine dendritic cells in vitro. *Chemosphere*, 2017, 177, pp. 56-64.
- [5] GRAVEL S. ET AL. – Assessment of occupational exposure to organic flame retardants: a systematic review. *Annals of work exposures and health*, 2019, 63, 4, pp. 386-406.
- [6] CHEN C.Y. ET AL. – Fast and environment-friendly GC-MS method for eleven organophosphorus flame retardants in indoor air, dust, and skin wipes. *Toxics*, 2021, 9 (12), p. 350.
- [7] SONEGO E. ET AL. – Characterization of organophosphate esters (OPEs) and polyfluoroalkyl substances (PFASs) in settled dust in specific workplaces. *Environ Sci Pollut Res*, 2022, 29, pp. 52302-52316.
- [8] MA Y. ET AL. – Human exposure to halogenated and organophosphate flame retardants through informal e-waste handling activities: a critical review. *Environmental pollution*, 2021, 268, Part A.
- [9] ESTÈVE W. ET AL. – Évaluation de l'exposition aux produits chimiques par les prélèvements surfaciques. *Références en santé au travail*, 2019, 158, TF 270, pp. 85-94.
- [10] THERKORN J.H. ET AL. – Methods to assess dermal exposures in occupational settings: a scoping review. *Annals of work exposures and health*, 2024, 68, 4, pp. 351-365.
- [11] LIU X. ET AL. – Occurrence of organophosphorus flame retardants on skin wipes: insight into human exposure from dermal absorption. *Environment international*, 2017, 98, 1, pp. 113-119.

Enjeux sanitaires et perspectives

L'enjeu est désormais d'appliquer cette stratégie à l'ensemble des sites de traitement des DEEE. Ce modèle d'intervention pourrait également servir de cadre pour l'évaluation d'autres familles de substances émergentes ou préoccupantes dans des secteurs industriels similaires.

Les résultats consolidés, à paraître, permettront d'apporter de la connaissance sur les expositions en vue de former et d'informer, de proposer des recommandations ciblées et d'orienter l'ensemble des acteurs de la prévention vers une meilleure maîtrise des risques sanitaires liés aux RF dans les secteurs des DEEE.

Préconisations pour la prévention dans la filière DEEE

À ce stade, les observations de terrain et les premières données orientent vers des recommandations d'ordre général :

- maîtrise des émissions à la source, en agissant sur les paramètres des procédés, par le capotage, le confinement et la ventilation des opérations émissives (broyeurs, trémies d'alimentation, cabines de tri, etc.) ;
- nettoyage régulier des locaux et des postes de travail pour éviter les remises en suspension de poussières ;
- protection individuelle adaptée, notamment en priviliégiant dans les zones critiques les cagoules à adduction d'air (*guide ED 6106 et brochure ED 98 de l'INRS; cf. Pour en savoir plus*).
- renforcement des mesures d'hygiène, avec vestiaires bi-zones (zones propres et sales séparées), sanitaires adaptés pour le lavage fréquent des mains et du visage, douches et nettoyage professionnel des vêtements de travail ;
- information et formation des travailleurs, avec :
 - une sensibilisation systématique des opérateurs aux risques d'exposition aux RF, à leurs effets potentiels, et aux bonnes pratiques de prévention ;
 - une formation spécifique pour les femmes en âge de procréer, en lien avec les recommandations sur les perturbateurs endocriniens (*brochure INRS ED 6377 et dossier DO 40 ; cf. Pour en savoir plus*). ●

1. Voir : <https://echa.europa.eu/fr/candidate-list-table>

2. Voir : https://www.inrs.fr/publications/bdd/metropol/fiche.html?refINRS=METROPOL_457 ; et : https://www.inrs.fr/publications/bdd/metropol/fiche.html?refINRS=METROPOL_458

3. PBDE : Polybromodiphényléthers. TBBPA : Tétrabromobisphénol A. HBCD : Hexabromocyclododécane. DPP : Diphénylphosphate. TPP : Triphénylphosphate. TEP : Triéthylphosphate. TCP : Tricrésylphosphate. TCPP : Tri(1-chloro-2-propyl)phosphate. TCEP : Tri(2-chloroéthyl)phosphate. TEHP : Tri(2-éthylhexyl)phosphate. TDCPP : Tri(1,3-dichloro-2-propyl)phosphate. TBP : tributylphosphate.

4. Certaines analyses ont été réalisées en adaptant les méthodes MetroPol afin de couvrir l'analyse des 20 RF recherchés.

An artistic illustration at the top of the page. It features silhouettes of people in various poses (walking, talking, sitting) and a city skyline with a prominent tower. The colors are a mix of purple and orange. A dotted circle in the upper left contains the text 'JOURNÉE TECHNIQUE'.

JOURNÉE
TECHNIQUE

Mardi 24 novembre 2026

Vingt ans de prévention des risques psychosociaux : quelles avancées sur le terrain ?

Depuis le premier colloque de l'INRS consacré à la prévention du stress au travail en 2007, la démarche et les outils, le cadre réglementaire, la jurisprudence et les formes d'organisation du travail ont profondément évolué. Les risques psychosociaux (RPS) sont désormais considérés comme des risques professionnels à part entière.

Cette journée technique organisée par l'INRS propose de faire le point, vingt ans après, sur les avancées concrètes de la prévention des RPS sur le terrain.

À partir de retours d'expériences en entreprises, elle mettra en lumière les conditions de réussite mais aussi les limites et les écueils rencontrés. Les interventions s'appuieront notamment sur le cadre de référence de l'INRS, les quatre circonstances pour agir et les étapes d'une démarche de prévention structurée, centrée sur le travail réel et son organisation.

Cette journée s'adresse à l'ensemble des acteurs de la santé et sécurité au travail en entreprises.

A small, stylized orange city skyline illustration with a prominent tower, located at the bottom right of the page.

Maison de la RATP - Espace du Centenaire - 189 rue de Bercy - 75012 Paris
Participation sur place ou en direct sur internet | Inscription obligatoire

Inscription : rps2026.inrs.fr - Contact : rps2026@inrs.fr

Notes techniques

PROPOSITION DE CLASSIFICATION DE LA PULVÉRULENCE DES POUDRES PAR LA MÉTHODE DE L'AGITATEUR VORTEX

Dans le cadre de l'évaluation des risques chimiques liés à l'exposition par inhalation, la pulvérulence des matériaux manipulés à l'état de poudres est un élément déterminant en matière de prévention. Afin de fournir aux préventeurs des informations sur les émissions d'aérosols lors d'opérations mettant en œuvre des matériaux en vrac, l'INRS et le CEA proposent dans cet article une classification des indices de pulvérulence mesurés à partir de la méthode de l'agitateur vortex.

SÉBASTIEN
BAU
INRS,
département
Métrologie
des polluants

JOSÉPHINE
STECK,
MAËLIS
VAYSSIÉ,
BASTIEN
PELLEGRIN,
SÉBASTIEN
JACQUINOT
Commissariat
à l'énergie
atomique et
aux énergies
alternatives
(CEA)

L'évaluation des risques chimiques est une démarche clé pour la prévention des risques professionnels. Son objectif est de contribuer à la sécurité des travailleurs en identifiant les risques chimiques et en mettant en place des actions de prévention appropriées. Cette évaluation doit être formalisée dans le document unique d'évaluation des risques professionnels¹. L'outil Seirich² déve-

loppé par l'INRS permet de réaliser cette évaluation du risque chimique. Elle suit plusieurs étapes structurées qui sont rappelées ci-dessous [1] :

- tous les produits chimiques utilisés ou générés sont exhaustivement répertoriés par zone et tâche de travail en prenant en compte tous leurs états physiques (solides, liquides, gazeux). Pour chaque produit chimique, il est essentiel d'identifier les dangers associés, à partir des fiches de données de

RÉSUMÉ

La pulvérulence, qui représente la capacité d'une poudre à émettre un aérosol, est un facteur clé d'exposition par inhalation aux substances chimiques. Sa connaissance contribue à la prévention du risque chimique : choix des matériaux les moins émissifs, dimensionnement des protections collectives, hiérarchisation des risques chimiques, intégration dans des outils d'évaluation des risques. Dans cet article, l'INRS et le CEA proposent de définir quatre classes de pulvérulence (de très faible à élevée) à partir des indices mesurés par la méthode de l'agitateur vortex. Cette classification, issue de l'analyse de plus de 160 poudres, permet d'évaluer le potentiel d'émission d'aérosols lors d'opérations mettant en œuvre des matériaux en vrac.

PROPOSAL FOR CLASSIFICATION OF FLOWABILITY OF POWDERS BY THE VORTEX AGITATOR METHOD

Flowability, which represents the capacity of a powder to emit an aerosol, is a key factor in inhalation exposure to chemicals. Its characterisation contributes to the prevention of chemical risks: choice of the least emissive materials, scaling of collective protection, ranking of chemical risks, integration of risk assessment tools. In this article, INRS and CEA (the French Commissariat for Alternative Energies) propose a definition of four flowability classes (from very low to high) linked to indexes measured using the vortex agitator method. This classification, based on the analysis of over 160 powders, can be used to assess potential aerosol emissions during operations involving bulk materials.



© Serge Morillon pour l'INRS / 2021

- sécurité (FDS) ou encore de bases de données telles que celle de l'ECHA (*European CHemicals Agency*) ;
- il est indispensable de déterminer par quelle(s) voie(s) les travailleurs peuvent être exposés aux produits chimiques (inhalation, ingestion ou contact/passage cutané), ainsi que la quantité mise en œuvre ;
 - une fois l'exposition identifiée, il convient de déterminer le niveau de risque (combinaison du danger et de l'exposition) pour chaque produit chimique ;
 - l'évaluation du risque résiduel repose sur le danger, le procédé mis en œuvre, la durée, la quantité des substances utilisées, leur volatilité, les moyens de protection collective. Cette étape permet de déterminer si les mesures existantes sont suffisantes ou si des ajustements doivent être faits ;
 - enfin, les risques sont hiérarchisés en fonction de leur gravité et de leur probabilité, afin d'établir un plan d'action. Ce dernier a pour objectif de réduire les risques à un niveau aussi bas que possible, en mettant en place des mesures de prévention et en s'assurant de leur efficacité.

Des mesures de prévention peuvent être étudiées et évaluées à l'aide d'outils spécifiques tels que les fiches d'aides au repérage (FAR) et à la substitution (FAS)³, le logiciel ProtecPo⁴ pour aider à la sélection des matériaux de protection cutanée, l'outil Mixie

pour évaluer les polyexpositions chimiques⁵, ou encore la liste SIN (*Substitute It Now*) qui propose des aides à la substitution⁶.

Un aspect particulièrement délicat de l'évaluation des risques liés à l'exposition par inhalation concerne la volatilité des produits chimiques. Si celle-ci est évaluée pour les solvants par l'intermédiaire de la pression de vapeur saturante ou de leur température d'ébullition [1], l'exposition par inhalation liée à la manipulation de matériaux en poudre (par exemple lors du transvasement, de la pesée, du mélange...) est plus complexe. Dans ce cas, on parlera de pulvéulence, qui représente la capacité d'une poudre à générer un aérosol à la suite d'une sollicitation mécanique (chute, vibration, fluidisation) [2]. Également appelée pouvoir de resuspension, la pulvéulence des matériaux solides en vrac vise à fournir aux utilisateurs des informations sur leur potentiel d'empoussièrement lorsqu'ils sont manipulés sur les lieux de travail.

Pour évaluer la capacité d'un matériau solide à émettre des poussières, et *in fine* le risque de dispersion dans l'air, la granulométrie (poudres fines *vs* matériaux plus grossiers) des matériaux en poudre et/ou sous d'autres formes (poussières, fibres, granulés, pastilles, etc.) est actuellement utilisée [1,3,4]. Cette approche peut être améliorée en évaluant la

Quantification de la pulvéulence des matériaux par la méthode de l'agitateur vortex dans un laboratoire de l'INRS.



capacité d'une poudre à être mise en suspension *via* une mesure expérimentale d'indices de pulvé- rulence, suivant des méthodes d'essais dédiées.

La mesure de la pulvé- rulence des poudres par la méthode de l'agitateur vortex

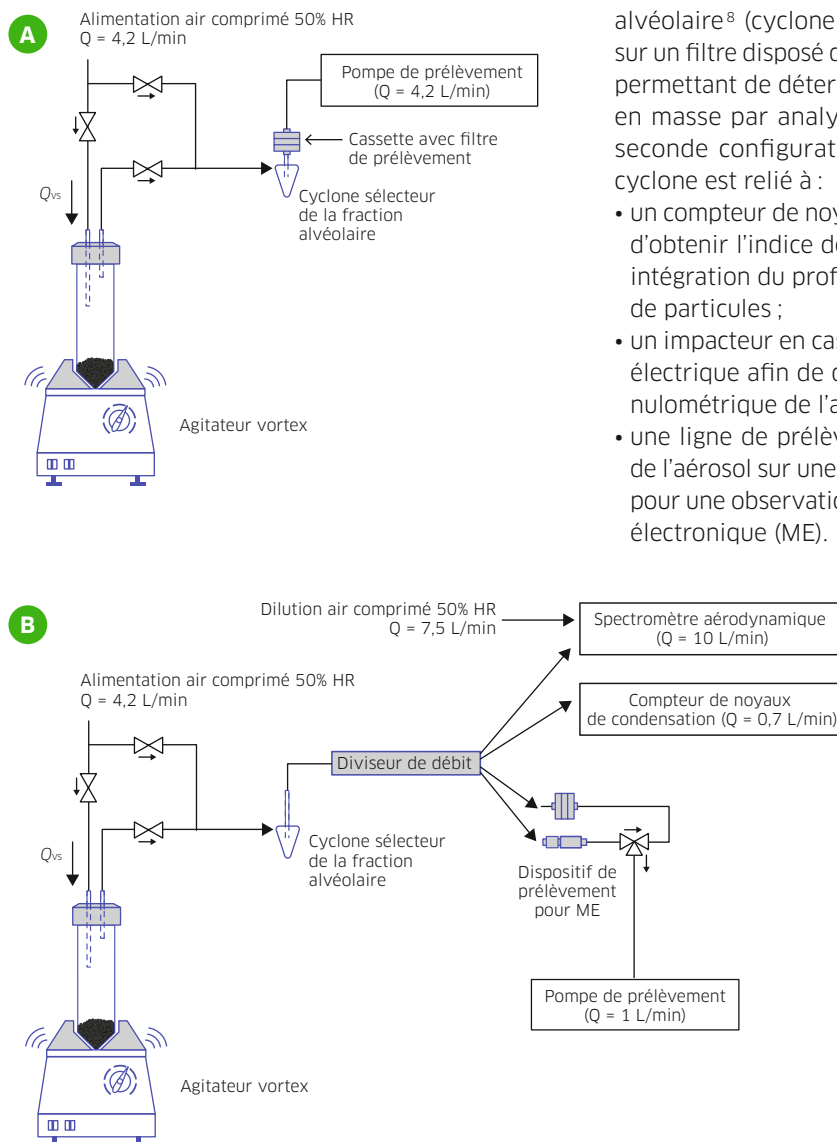
Différentes méthodes de mesure de pulvé- rulence co-existent [5]. La méthode retenue doit être choisie soigneusement afin d'être représentative du scé- nario d'utilisation visé. Complémentaire à d'autres méthodes de mesure de la pulvé- rulence, la méthode dite de l'agitateur vortex (selon la norme NF EN 17199-5 de novembre 2025⁷) a été initialement développée pour être appliquée aux nanomatériaux [6]. Par conséquent, et conformément aux précon- sations relatives à la mise en œuvre de nanomaté- riaux [7], c'est la fraction alvéolaire de l'aérosol qui est sélectionnée pour être analysée. En raison des fortes sollicitations mécaniques impliquées, cette méthode est souvent considérée comme majorante.

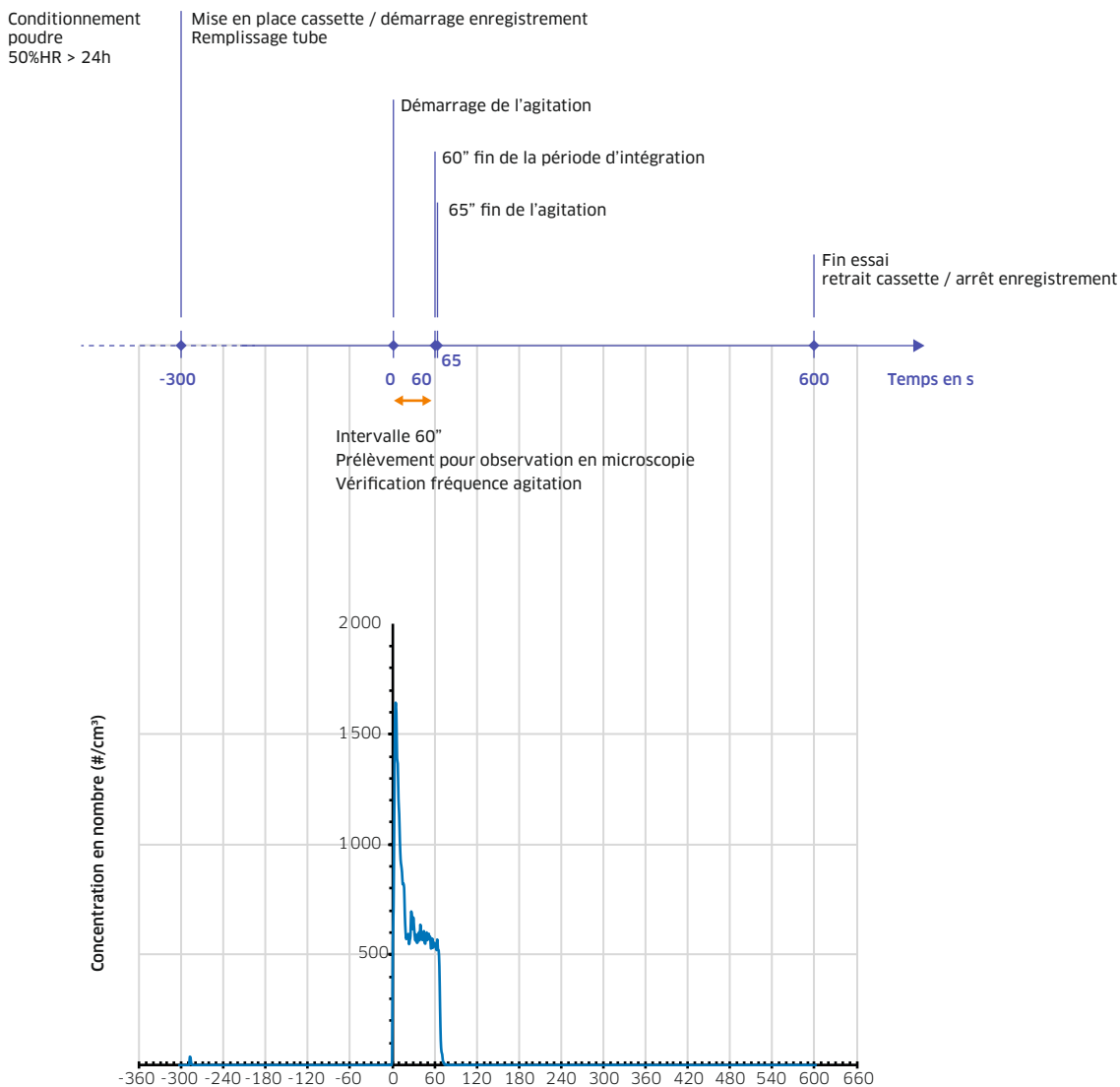
Elle est pertinente pour la simulation des scénarios défavorables de type nettoyage de poste, vibration durant un transport de poudres, voire situations accidentelles. Des mesures de pulvé- rulence ont été effectuées sur de nombreuses substances en utili- sant cette méthode, qu'il s'agisse de nanomatériaux ou non.

La méthode de l'agitateur vortex (VS pour *vortex shaker*) utilise un tube cylindrique en acier inoxy- dable avec fond conique agité par un vortex (*IKA Vortex Genius 3*) dans lequel le matériau en poudre testé est placé (0,5 cm³ de poudre). L'échantillon est conditionné à 50 ± 5 % d'humidité relative, au moins 24 heures avant l'expérience. Le cylindre est secoué pendant 65 secondes selon un mou- vement orbital circulaire (amplitude de déplace- ment 4 mm, vitesse de rotation 1800 rpm). De l'air propre (filtre à très haute efficacité) et contrôlé à 50 ± 5 % d'humidité relative pour une tempé- rature de 21 ± 3 °C est introduit à un débit de 4,2 L/min dans le cylindre et entraîne l'aérosol. Ce dernier traverse un cyclone sélectionnant la fraction alvéolaire⁸ (cyclone GK2.69) avant d'être collecté sur un filtre disposé dans une cassette (Cf. *Figure 1A*), permettant de déterminer l'indice de pulvé- rulence en masse par analyse gravimétrique⁹. Dans une seconde configuration (Cf. *Figure 1B*), l'aval du cyclone est relié à :

- un compteur de noyaux de condensation¹⁰ en vue d'obtenir l'indice de pulvé- rulence en nombre par intégration du profil de concentration en nombre de particules ;
- un impacteur en cascade basse pression à mesure électrique afin de déterminer la distribution gran- ulométrique de l'aérosol [8-9] ;
- une ligne de prélèvement permettant la collecte de l'aérosol sur une courte durée (5 à 10 secondes) pour une observation subséquente en microscopie électronique (ME).

FIGURE 1 → Banc d'essais pour la mesure de la pulvé- rulence des poudres par la méthode de l'agitateur vortex :
A : configuration prélèvement.
B : configuration mesures en temps réel.





← FIGURE 2
Séquence d'un
essai de mesure
de pulvérulence
et exemple d'un
profil temporel
de concentration
en particules
pour une poudre
utilisée en cabine
de peinture.

La configuration expérimentale du dispositif de mesure (Cf. Figures 1A et 1B) est donc modifiée en aval, en fonction des paramètres requis. Pour une substance donnée, trois essais sont réalisés pour chacune des deux configurations. Les valeurs retenues (indices de pulvérulence en masse et en nombre, distribution granulométrique) correspondent à la moyenne et à l'écart-type de ces triplicats. La séquence expérimentale d'un essai est détaillée sur la Figure 2 (partie haute).

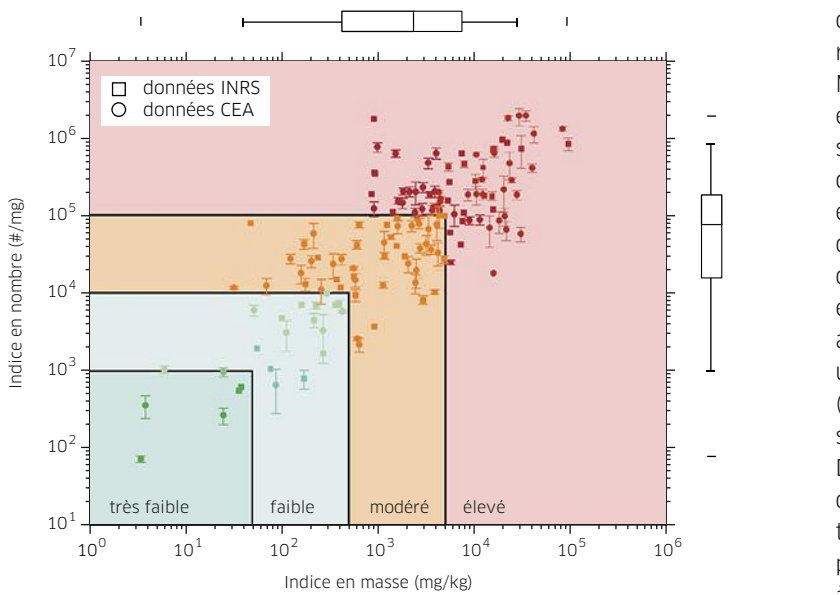
La partie basse de la Figure 2 présente un exemple de profil temporel de concentration en nombre obtenu pour une poudre utilisée en cabine de peinture. À l'instant initial ($T=0$), correspondant au démarrage de l'agitation, un pic d'émission est observé : la concentration en nombre des particules passe subitement de 0 particules/cm³ d'air (#/cm³) à plus de 1500 #/cm³, avant de se stabiliser à un niveau proche de 500 #/cm³. À la fin de l'agitation ($T = 65$ secondes), la concentration des particules

chute et revient au niveau initial voisin de 0 #/cm³. Ce profil peut être très variable d'une poudre à une autre, tout comme les niveaux de concentration enregistrés.

L'indice de pulvérulence en masse en fraction alvéolaire s'exprime en milligrammes d'aérosol par kilogramme de poudre (mg/kg) ; il est déterminé en divisant la masse recueillie sur le filtre (en milligrammes : mg) par la masse de poudre placée dans le tube cylindrique (en kilogrammes : kg).

L'indice de pulvérulence en nombre en fraction alvéolaire s'exprime en nombre de particules par milligramme de poudre (#/mg). Il est obtenu en divisant le nombre cumulé de particules émises sur les premières 60 secondes de vibration par la masse de poudre placée dans le tube cylindrique (en mg). Les coefficients de variation (écart-type/moyenne) observés sont inférieurs à 30 % pour 75 % des indices en masse et pour plus de 80 % des indices en nombre issus des mesures réalisées sur près





↑ FIGURE 3 Indices de pulvéulence en fraction alvéolaire (en masse et en nombre) mesurés sur plus de 160 poudres par l'INRS et le CEA.

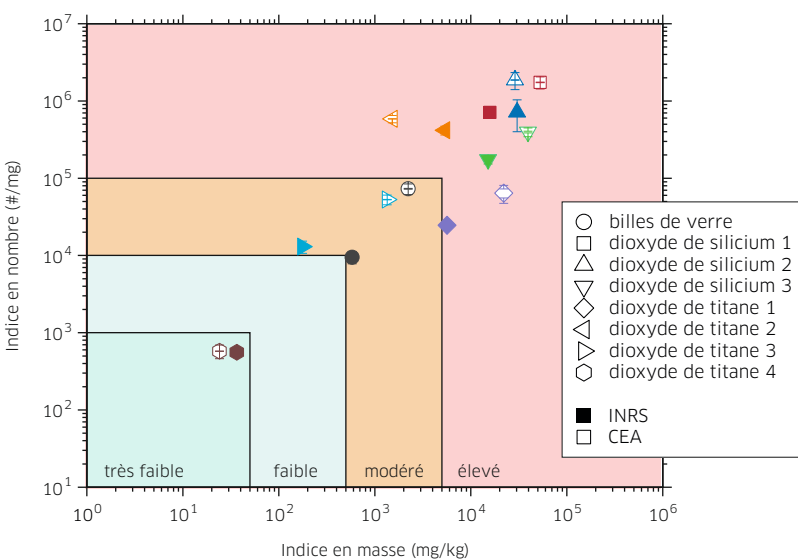
de 160 matériaux différents, ce qui démontre une répétabilité satisfaisante pour les trois essais. Même si elle n'est pas requise dans la norme, il est proposé de quantifier la proportion que représente la fraction analysée (i.e., la fraction alvéolaire de l'aérosol par rapport à l'ensemble de l'aérosol émis en sortie du cylindre), en raison de la présence d'un sélecteur de la fraction alvéolaire dans le banc d'essais. L'interprétation des résultats doit être faite en tenant compte de ce que représente la fraction analysée. Par exemple, pour les aérosols comportant une proportion importante de particules grossières (de diamètres supérieurs à 10 µm), la fraction analysée représente moins de 20 % [10] de l'aérosol émis. De plus, la mesure de la distribution granulométrique de l'aérosol est également réalisée en aval du sélecteur de la fraction alvéolaire. Pour cette raison, il n'est pas possible de mesurer des particules supérieures à environ 6 µm. Les observations en microscopie électronique des prélèvements réalisés dans la configuration B permettent de démontrer la présence de NOAA (nano-objets, leurs agrégats et agglomérats).

CLASSE DE PULVÉULENCE	INDICE EN NOMBRE (#/mg)	INDICE EN MASSE (mg/kg)	EXEMPLE DE POUDRE
Très faible	< 10 ³	< 50	Café moulu
Faible	10 ³ - 10 ⁴	50 - 500	Sucre glace
Modérée	10 ⁴ - 10 ⁵	500 - 5000	Cannelle
Élevée	> 10 ⁵	> 5000	Ciment

↑ TABLEAU 1 Seuils proposés pour les quatre classes de pulvéulence par la méthode de l'agitateur vortex.

Proposition de classes de pulvéulence

Contrairement aux deux méthodes historiques (tambour rotatif – norme NF EN 15051-2+A1¹¹ – et chute continue – norme NF EN 15051-3¹²), la méthode de l'agitateur vortex ne permet pas à ce jour de catégoriser les matériaux sous forme de poudre selon différentes classes de pulvéulence (très faible, faible, modéré, élevé). Face à ce constat, l'INRS et le CEA (établissement de Grenoble) ont mis en commun leurs bases de données d'indices de pulvéulence afin de proposer des classes. Plus de 160 matériaux en poudre (dont près de 50 % identifiés comme nanomatériaux) constituent cette base. Ces poudres proviennent principalement de recherches en lien avec la sécurité des nanomatériaux, y compris les plus couramment utilisés en France¹³, ainsi que des poudres issues de produits du quotidien (14 au total, parmi lesquelles figurent : ciment, talc, cannelle, mortier, craie). Certaines familles de poudres se distinguent, telles que les dioxydes de titane (TiO₂, 17 poudres), les dioxydes de silicium (SiO₂, huit poudres), les ciments (sept poudres), ou encore différentes formes de poudres carbonées (noirs de carbone : quatre poudres, nanotubes de carbone : quatre poudres, nanofibres de carbone : trois poudres). La Figure 3 présente les indices de pulvéulence (fraction alvéolaire) en nombre (axe des ordonnées) et en masse (axe des abscisses) mesurés sur l'ensemble de ces substances. Il est intéressant de mentionner que les indices de pulvéulence couvrent près de cinq ordres de grandeur, de 3 mg/kg à plus de 90 000 mg/kg pour l'indice en masse, et de 70 #/mg à près de 2×10⁶ #/mg pour l'indice en nombre. Les données présentées suggèrent qu'il



↑ FIGURE 4 Comparaison des indices de pulvéulence en nombre et en masse obtenus pour huit poudres communes par l'INRS (symboles pleins) et le CEA (symboles creux).

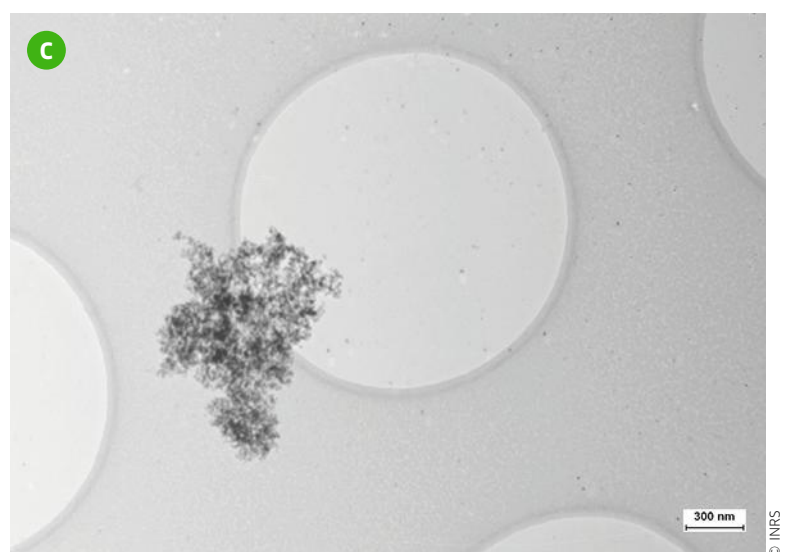
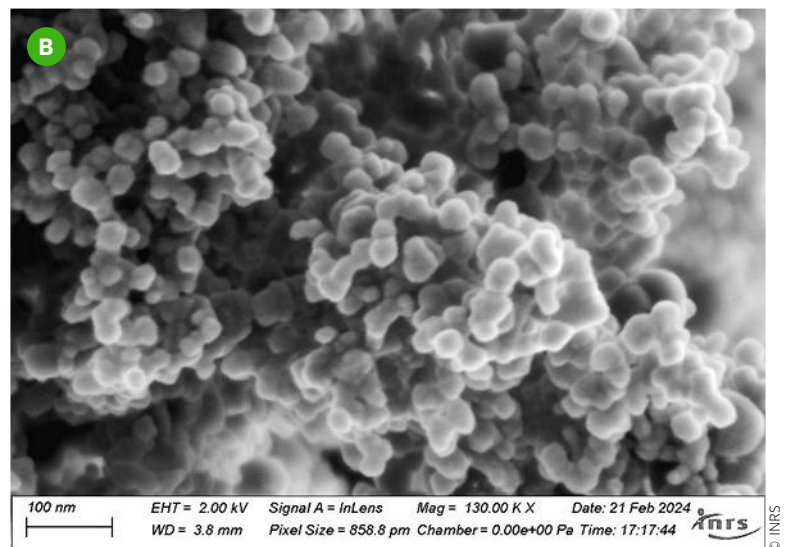
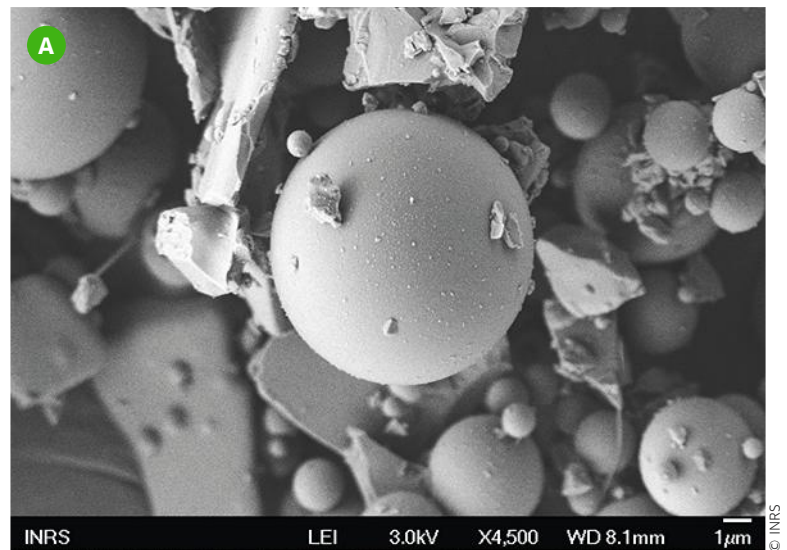
existe une tendance linéaire entre ces deux indices ; si l'on multiplie par un facteur 10 l'indice de pulvéulence en masse, on multiplie également par un facteur de l'ordre de 10 l'indice de pulvéulence en nombre. Enfin, les « boîtes à moustaches » des indices sont également représentées, à l'extérieur du graphe (à droite, en nombre ; en haut, en masse), montrant la répartition des indices de pulvéulence observés sur l'ensemble des matériaux considérés.

À partir de ces données, quatre classes de pulvéulence associées à la méthode de l'agitateur vortex et combinant les indices en nombre et en masse peuvent être proposées. Disposer d'une telle échelle permet d'évaluer plus précisément les risques d'émission de particules dans l'air et de pouvoir prévenir l'inhalation de substances chimiques, en renforçant la protection des travailleurs qui produisent ou manipulent ces poudres. Étant donné la plage d'indices couverte, cette dernière a été divisée en quatre intervalles égaux en échelle logarithmique entre les valeurs extrêmes. Ce découpage permet de proposer des classes qui sont indépendantes de la répartition des valeurs observées pour les différentes substances constituant la base de données (quartiles des boîtes à moustaches). L'analyse conduit aux seuils présentés dans le *Tableau 1*. Pour chacune des quatre classes, un exemple de poudre est proposé. À noter que dans le cas d'une poudre qui serait classée dans deux catégories différentes selon l'indice considéré (en nombre ou en masse), il convient de considérer la classe de pulvéulence la plus élevée. Les seuils présentés dans ce tableau constituent une première proposition qui pourra évoluer si des données complémentaires sont intégrées à la base de données.

Essai inter-laboratoires

Afin de statuer sur la validité des classes proposées et de fournir des éléments en matière de variabilité inter-laboratoires, les indices de pulvéulence obtenus sur huit échantillons communs (trois dioxydes de silicium SiO_2 , quatre dioxydes de titane TiO_2 , et un échantillon de billes de verre) et couvrant toute la plage d'indices, ont été déterminés par l'INRS et le CEA. Les résultats sont présentés sur la *Figure 4*. Afin de montrer la diversité des morphologies de particules, des images de microscopie électronique des aérosols produits à partir de trois de ces poudres sont également proposées sur la *Figure 5*.

Les résultats présentés en *Figure 4* montrent que toutes les substances sont catégorisées dans les mêmes classes suivant les seuils proposés dans le *Tableau 1*, qu'il s'agisse des données produites par l'INRS ou par le CEA. Il est également constaté que, pour un échantillon de poudre donné, les valeurs absolues des indices de pulvéulence peuvent présenter des écarts. Ces derniers peuvent être dus à des différences sur :



↑ FIGURE 5 Exemples de clichés de microscopie électronique pour quelques matériaux provenant de la base commune INRS / CEA. A : billes de verre, B : dioxyde de titane, C : dioxyde de silicium.



© Louis Martin pour l'INRS / 2019

Expérimentation en laboratoire par la méthode de l'agitateur vortex.

- les bancs d'essais impliqués (longueurs et natures des tubes, présence de singularités de type coudes) ;
- les performances des appareils de mesure utilisés (typiquement : 5 % à 15 % entre deux compteurs de particules du même modèle) ;
- la nature des médias utilisés pour la collecte des aérosols, les conditions environnementales de la salle de pesée et les performances associées à l'analyse gravimétrique (répétabilité, limite de quantification).

Le fait que la classification soit équivalente entre les deux instituts pour chacune de ces huit poudres constitue un premier élément de validation de la reproductibilité de la méthode. À moyen terme, il pourrait être intéressant de disposer de matériaux de référence, idéalement pour chacune des classes proposées. Ceci permettrait aux laboratoires de réaliser un suivi des dispositifs impliqués dans la méthode d'essai (éléments du banc d'essais, appareils de métrologie des aérosols, équipements pour

l'analyse gravimétrique, etc.) et de fiabiliser les résultats des mesures de pulvérulence.

Perspectives

De nombreuses propriétés du matériau influencent la pulvérulence des poudres [11-15]. Il n'est pas possible de déterminer précisément leur indice de pulvérulence à partir de leurs seules propriétés physico-chimiques. Cependant, les données existantes montrent que ces derniers augmentent généralement lorsque la surface spécifique externe des poudres augmente, lorsque la masse volumique apparente de la poudre diminue, ou encore lorsque l'humidité relative de la poudre diminue.

Les relations entre la pulvérulence des poudres, l'émission d'aérosols en lien avec une activité, et les niveaux d'expositions professionnelles correspondants sont complexes [16-24]. Les données issues des essais de pulvérulence peuvent être utilisées comme des données d'entrée pour l'évaluation qualitative ou quantitative de l'exposition. Compte tenu de la diversité des opérations impliquant des poudres sur les lieux de travail, quatre méthodes complémentaires de mesurage de la pulvérulence existent. Chacune de ces méthodes est supposée représentative de scénarios réels d'utilisation. Les résultats de pulvérulence qui en sont issus peuvent ainsi varier, pour un matériau donné, en fonction de la méthode choisie. Au-delà de l'émissivité des poudres, l'exposition par inhalation est la résultante de nombreux autres facteurs : transport, pertes ou dépôt de particules dans l'atmosphère de travail en lien avec la ventilation des locaux, distribution granulométrique des particules... En première intention, dans des outils d'évaluation des risques chimiques par bandes de danger, la prise en compte de la classe de pulvérulence des poudres constitue un levier important de prévention. En effet, lorsque cela est possible, choisir des matériaux moins pulvérulents aux propriétés fonctionnelles équivalentes (substitution) permet de limiter les émissions de poussières lors de leurs manipulations, et par voie de conséquence, les niveaux d'exposition des opérateurs. Les indices de pulvérulence d'un matériau et la distribution granulométrique des aérosols émis peuvent également constituer une donnée d'entrée pour le dimensionnement et la mise en place de moyens de protection collective – tels que le captage à la source, le confinement, ou la ventilation – toujours en vue de réduire l'exposition des travailleurs. À moyen terme, poursuivre l'alimentation de la base de données des indices de pulvérulence obtenus par la méthode de l'agitateur vortex devrait permettre d'affiner les seuils proposés pour les quatre classes. Enfin, au-delà de la question du risque d'exposition par inhalation, la connaissance de la pulvérulence des poudres peut également présenter un intérêt en matière de prévention des risques d'explosion¹⁴ [25]. ●

1. Voir : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=TS841page44> ; ou : <https://www.inrs.fr/demarche/document-unique/ce-qu-il-faut-retenir.html>
2. Voir : <https://www.seirich.fr/seirich-web/index.xhtml>
3. Voir : <https://www.inrs.fr/publications/bdd/far-fas.html>
4. Voir : <https://protecpo.inrs.fr/ProtecPo/jsp/accueil.jsp>
5. Voir : <https://www.inrs.fr/publications/outils/mixie.html>
6. Voir : <https://sinlist.chemsec.org/>
7. Voir : Norme NF EN 17199-5 – Exposition sur les lieux de travail - Mesurage du pouvoir de resuspension des matériaux en vrac contenant ou émettant des nano-objets et leurs agrégats et agglomérats (NOAA) ou autres particules en fraction alvéolaire, Partie 5 : Méthode impliquant l'utilisation d'un agitateur vortex. *Afnor*, 2025.
8. Voir la fiche du guide méthodologique MétroPol « Prélèvement des aérosols par cyclones ». Accessible sur : <https://www.inrs.fr/dms/inrs/PDF/metropol-prelevement-cyclone/metropol-prelevement-cyclone.pdf>
9. Voir la fiche du guide méthodologique MétroPol « Analyse gravimétrique ». Accessible sur : <https://www.inrs.fr/dms/inrs/PDF/metropol-analyse-gravimetrique/metropol-analyse-gravimetrique.pdf>
10. Voir la fiche du guide méthodologique MétroPol « Mesure en temps réel de la concentration en nombre d'un aérosol submicronique au moyen d'un compteur de noyaux de condensation ». Accessible sur : <https://www.inrs.fr/dms/inrs/PDF/metropol-tempsreel-aerosolsubmicronique/metropol-tempsreel-aerosolsubmicronique.pdf>
11. Voir : Norme NF EN 15051-2+A1 – Exposition sur les lieux de travail. Mesurage du pouvoir de resuspension des matériaux pulvérulents en vrac. Partie 2 : Méthode du tambour rotatif. *Afnor*, 2017.
12. Voir : Norme NF EN 15051-3 – Exposition sur les lieux de travail. Mesurage du pouvoir de resuspension des matériaux pulvérulents en vrac. Partie 3 : Méthode de la chute continue. *Afnor*, 2025.
13. Voir : <https://www.r-nano.fr/>
14. Voir : VDI 2263, Part 9 – Dust fires and dust explosions. Hazards, assessment, protective measures. Determination of dustiness of bulk materials.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] INRS – Démarche d'évaluation des risques chimiques : méthode développée pour le logiciel Seirich. ED 6485, 2024. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%206485>
- [2] LIDÉN G. – Dustiness testing of materials handled at workplaces. *The annals of occupational hygiene*, 2006, 50, pp. 437-439.
- [3] VINCENT R. ET AL. – Méthodologie d'évaluation simplifiée du risque chimique : un outil d'aide à la décision. *Hygiène & sécurité du travail*, 2005, ND 2233, pp. 39-62. Accessible sur : www.hst.fr
- [4] FRANSMAN W. ET AL. – Development of a mechanistic model for the advanced REACH tool (ART). TNO, 2010.
- [5] BAU S. ET AL. – Caractérisation des propriétés comportementales des poudres : l'écoulement et la pulvérisation. *Hygiène & sécurité du travail*, 2023, 272, pp. 29-36.
- [6] WITSCHGER O., DAZON C. – Pulvérisation de nanomatériaux : bilan et perspectives d'une décennie d'études et de recherche pour la prévention. *Hygiène & sécurité du travail*, 2019, 256, pp. 41-47.
- [7] WITSCHGER O. ET AL. – Préconisations en matière de caractérisation des potentiels d'émission et d'exposition professionnelle aux aérosols lors d'opérations mettant en œuvre des nanomatériaux. *Hygiène & sécurité du travail*, 2012, 226, pp. 41-55.
- [8] BAU S. ET AL. – La distribution granulométrique des aérosols au poste de travail : quels apports pour la santé et la sécurité au travail ? *Hygiène & sécurité du travail*, 2025, 279, pp. 5-10.
- [9] MATERA V., GAUDEL N., BAU S. – Intérêts et optimisation des prélèvements d'aérosols par impacteurs en cascade. *Hygiène & sécurité du travail*, 2022, 269, pp. 34-41.
- [10] BAU S. ET AL. – La distribution granulométrique des aérosols au poste de travail : quels moyens, quelles méthodes de mesure ? *Hygiène & sécurité du travail*, 2025, 279, pp. 70-77.
- [11] CHAKRAVARTY S. ET AL. – Towards a theoretical understanding of dustiness. *Granular matter*, 2019, 21, p. 97.
- [12] CHAKRAVARTY S. ET AL. – Dust generation in powders: effect of particle size distribution. *EPJ Web Conf.*, 2017, 140, 13018.
- [13] SHANDILYA N. ET AL. – Powder intrinsic properties as dustiness predictor for an efficient exposure assessment? *Annals of work exposures and health*, 2019, 63, pp. 1029-1045.
- [14] LEVIN M. ET AL. – Influence of relative humidity and physical load during storage on dustiness of inorganic nanomaterials: implications for testing and risk assessment. *Journal of nanoparticle research*, 2015, 17, pp. 1-13.
- [15] LÓPEZ LILAO A. ET AL. – Particle size distribution: A key factor in estimating powder dustiness. *Journal of occupational and environmental hygiene*, 2017, 14, pp. 975-985.
- [16] RIBALTA C. ET AL. – Use of the dustiness index in combination with the handling energy factor for exposure modelling of nanomaterials. *NanoImpact*, 2024, 33, 100493.
- [17] FONSECA A.S. ET AL. – Development of handling energy factors for use of dustiness data in exposure assessment modelling. *Annals of work exposures and health*, 2024, 68, pp. 295-311.
- [18] SCHNEIDER T., JENSEN K.A. – Relevance of aerosol dynamics and dustiness for personal exposure to manufactured nanoparticles. *Journal of nanoparticle research*, 2009, 11, pp. 1637-1650.
- [19] LEVIN M. ET AL. – Exposure assessment of four pharmaceutical powders based on dustiness and evaluation of damaged HEPA filters. *Journal of occupational and environmental hygiene*, 2014, 11, pp. 165-177.
- [20] RIBALTA C. ET AL. – On the relationship between exposure to particles and dustiness during handling of powders in industrial settings. *Annals of work exposures and health*, 2018, 63, pp. 107-123.
- [21] RIBALTA C. ET AL. – Health risk assessment from exposure to particles during packing in working environments. *Science of the total environment*, 2019, 671, pp. 474-487.
- [22] RIBALTA C. ET AL. – Testing the performance of one and two box models as tools for risk assessment of particle exposure during packing of inorganic fertilizer. *Science of the total environment*, 2019, 650, pp. 2423-2436.
- [23] RIBALTA C. ET AL. – Evaluation of one- and two-Box models as particle exposure prediction tools at industrial scale. *Toxics*, 2021, 9, p. 201.
- [24] BROUWER D.H. ET AL. – Size selective dustiness and exposure: simulated workplace comparisons. *The annals of occupational hygiene*, 2006, 50, pp. 445-452.
- [25] KLIPPEL A. ET AL. – Dustiness in workplace safety and explosion protection-review and outlook. *Journal of loss prevention in the process industries*, 2015, 34, pp. 22-29.

Étude de cas

DÉBIT D'AIR EXTRAIT SUR LES CHANTIERS DE DÉSAMIANTAGE : COMMENT LE MESURER ?

SULLIVAN
LECHÊNE,
JENNIFER
KLINGLER,
NICOLAS
VEITH
INRS,
département
Ingénierie des
procédés

→ **LA PROBLÉMATIQUE :** Afin d'assurer la protection des salariés et de l'environnement, les chantiers de désamiantage nécessitent la mise en œuvre d'un confinement dynamique, couplé à des mesures de réduction des émissions de fibres (captage à la source, pulvérisation, imprégnation par exemple). Le confinement dynamique permet d'éviter toute fuite de fibres d'amiante hors de la zone de travail en assurant, par l'intermédiaire d'un système de ventilation, une mise en dépression et un renouvellement suffisant en air neuf de la zone contaminée. Avant la mise en service de l'installation, les débits de ventilation doivent obligatoirement être contrôlés et conformes au dimensionnement prévu. Du côté de l'extraction d'air, seul le préfiltre en amont du ventilateur est accessible, ce qui ne permet pas d'utiliser les méthodes classiques de mesure de débit en conduit. La méthode en usage aujourd'hui et indiquée dans la réglementation [1] prévoit une mesure par exploration du champ de vitesses au niveau de l'ouverture. La surface de passage de l'air à travers le préfiltre étant difficilement mesurable, la surface totale est alors considérée dans le calcul du débit (produit de la vitesse moyenne mesurée par la surface totale du préfiltre), et un facteur de correction de 0,6 est appliqué. Des questionnements subsistent sur l'origine et la pertinence de cette correction. Une campagne de mesure en laboratoire s'est donc attachée à vérifier la pertinence du coefficient appliqué pour le calcul du débit dans la configuration type d'un chantier de désamiantage et à établir des recommandations sur la méthode de mesure du débit. Une méthode de mesure alternative *via* l'utilisation d'un balomètre a également été testée.

→ **LA RÉPONSE DE L'INRS**
Aéraulique du confinement dynamique d'un chantier de désamiantage
Caractéristiques

Le confinement dynamique d'un chantier de désamiantage est réalisé en suivant la méthode du bilan aéraulique prévisionnel [2]. Cette méthode

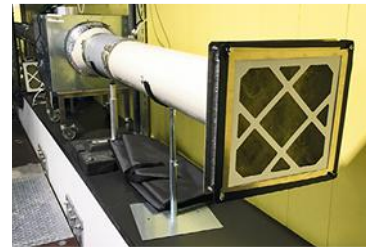
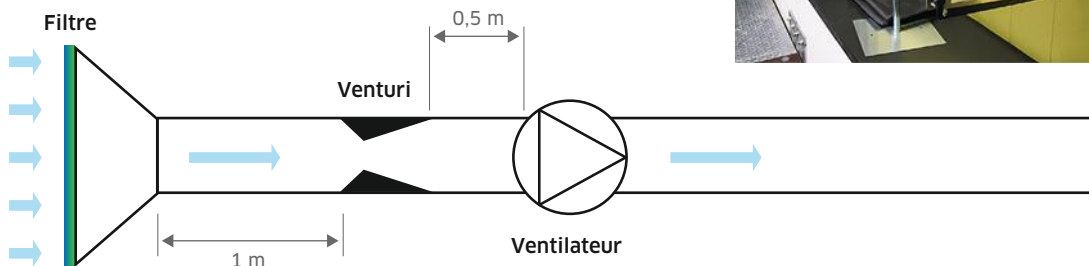
permet aux entreprises d'identifier et de dimensionner tous les éléments nécessaires au bon fonctionnement du confinement et ce tout au long de la durée du chantier. Le bilan aéraulique permet ainsi de concevoir une installation de ventilation assurant un renouvellement suffisant en air neuf dans la zone de travail avec une répartition la plus homogène possible et de garantir le respect de la dépression minimale de 10 Pa par rapport à l'extérieur. Les différents débits d'air neuf et d'extraction mis en jeu sont définis et dimensionnés afin de répondre aux objectifs de l'installation. Après installation sur le chantier, les débits de ventilation sont obligatoirement contrôlés et doivent être conformes au dimensionnement prévu.

Mesures du débit extrait

L'air extrait vers l'extérieur de la zone est filtré pour assurer un rejet épuré de fibres d'amiante. Le système de filtration comporte plusieurs étages, avec *a minima* un préfiltre grossier suivi d'un filtre à très haute efficacité. Généralement, seul le préfiltre est accessible (depuis l'intérieur du confinement) pour la mesure du débit (Cf. Figure 1). La méthode de mesure par exploration du champ de vitesses dans



↑ FIGURE 1 Préfiltre au niveau d'un extracteur [2].



← FIGURE 2
Veine aéraulique
expérimentale
(schéma).



← FIGURE 3
Filtres utilisés
lors de la
campagne
de mesure.

Filtre G4, dimensions
305 mm x 305 mm

Filtre G3, dimensions
305 mm x 305 mm

Filtre G4, dimensions
610 mm x 610 mm

Filtre G3, dimensions
610 mm x 610 mm

l'ouverture, utilisée par les entreprises, consiste à balayer la surface du filtre avec un anémomètre à hélice. Le débit est alors calculé selon l'équation suivante :

$$Q_v = 0,6 \cdot v_m \cdot S_t \cdot 3\,600$$

Avec¹ :

Q_v : le débit volumique extrait [$\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$];
 v_m : la vitesse moyenne mesurée [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$];
 S_t : la surface totale du filtre [m^2].

Objectifs de la campagne de mesure

L'objectif était d'évaluer le débit d'air extrait au niveau du filtre Q_{filtre} [$\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$] et de le comparer au débit de référence Q_{ref} [$\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$] mesuré par un tube Venturi (Badger Meter GmbH, Allemagne), calibré par le Cetiati, afin d'obtenir le facteur de correction α :

$$\alpha = \frac{Q_{\text{ref}}}{Q_{\text{filtre}}} = \frac{Q_{\text{ref}}}{v_m \cdot S_t \cdot 3\,600}$$

Matériels et méthodes

Dispositif expérimental

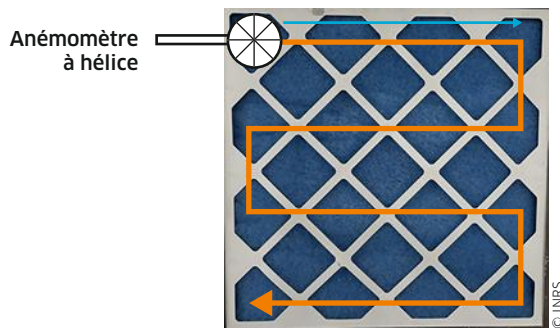
La veine aéraulique schématisée sur la Figure 2 est constituée d'un ventilateur, d'un préfiltre de mêmes type et dimensions que ceux utilisés dans les chantiers de désamiantage, de conduits de

diamètre 200 mm et d'un tube Venturi pour mesurer le débit de référence dans la veine. Le tube Venturi est positionné entre le filtre et le ventilateur avec des longueurs droites volontairement réduites pour s'affranchir au maximum de fuites d'air éventuelles entre la mesure de référence et la mesure au filtre. Cette position ne respecte pas les longueurs droites de conduit préconisées dans la norme NF EN ISO 5167-4 [3] pour l'utilisation d'un tube Venturi. Une campagne de mesure préalable a permis de valider ce positionnement en comparant le débit évalué au tube Venturi à des mesures de débits réalisées avec un diaphragme placé à une distance suffisante de toute singularité dans le réseau. Dans cette position, le tube Venturi permet d'obtenir un débit d'air avec un écart inférieur à 5 % du débit mesuré au diaphragme, ce qui permet de considérer cette mesure comme notre mesure de référence. La non-perturbation de la mesure au tube Venturi malgré des longueurs droites de conduits très courtes est probablement due à la présence du filtre qui homogénéise le flux d'air en amont du tube Venturi.

Le filtre est inséré côté extraction dans un cadre en aluminium pouvant s'adapter au conduit de la veine de mesure. Deux tailles de filtre avec des surfaces de 305 mm x 305 mm et



FIGURE 4 →
Schéma
de balayage
de la surface
du filtre avec
un anémomètre
à hélice.



610 mm x 610 mm ont été testées² (Cf. Figure 3). La présence du cadre en aluminium réduit légèrement ces dimensions respectivement à 300 mm x 300 mm et 600 mm x 600 mm. Ces dernières valeurs sont considérées dans le calcul du débit mesuré au niveau du filtre.

Protocoles de mesure

→ Évaluation du débit d'air au niveau du filtre via une mesure de vitesse

Le débit d'air au niveau du filtre est évalué comme le produit de la vitesse d'air moyenne par la surface totale du filtre. Les mesures de vitesse sont réalisées avec un anémomètre multifonction Testo 400 muni d'une sonde à hélice de diamètre 100 mm (Testo SARL, UE). Le principe consiste à placer l'hélice contre le filtre et à balayer toute sa surface en enregistrant les signaux de vitesse

à une fréquence fixée à 1 seconde (Cf. Figure 4). La durée de balayage est semblable entre les essais et varie suivant la taille du filtre: entre 15 et 20 secondes pour le filtre de dimensions 305 mm x 305 mm et entre 35 et 40 secondes pour le filtre de dimensions 610 mm x 610 mm. Le résultat d'une mesure correspond à la moyenne des signaux de vitesses mesurés durant la période de balayage.

→ Mesure directe du débit d'air au niveau du filtre

Le balomètre permet une mesure directe du débit d'air. L'appareil est constitué d'un cône ou d'une jupe fixé à un élément de mesure de pression différentielle permettant d'évaluer le débit d'air. Le principe consiste à placer le cône de manière étanche autour du filtre afin que le flux d'air traverse l'élément de mesure (Cf. Figure 5). Les balomètres Testo 420 et FlowFinder MK2 (ACIN instrumenten, UE) ont été utilisés avec des jupes de dimensions 610 mm x 610 mm (Cf. Figure 6). Le dernier balomètre cité présente la particularité de compenser la perte de charge créée par le positionnement de l'appareil. Le résultat d'une mesure correspond à la moyenne des signaux de débits durant une période de 20 secondes (fréquence d'acquisition fixée à 1 seconde). Chaque mesure est répétée trois fois pour évaluer la répétabilité du protocole. Le résultat final correspond à la moyenne de ces trois répétitions.

FIGURE 5 →
Schéma
de principe
pour la mesure
au balomètre.

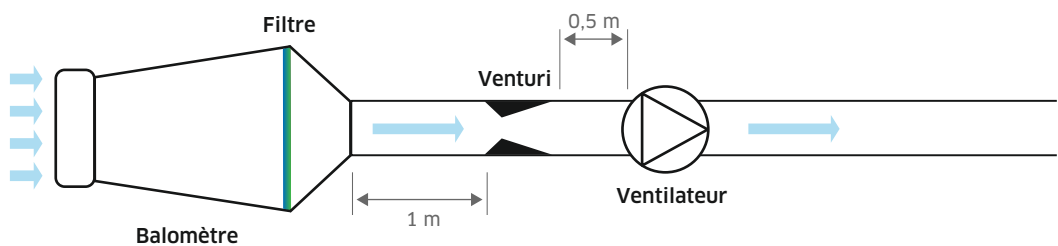
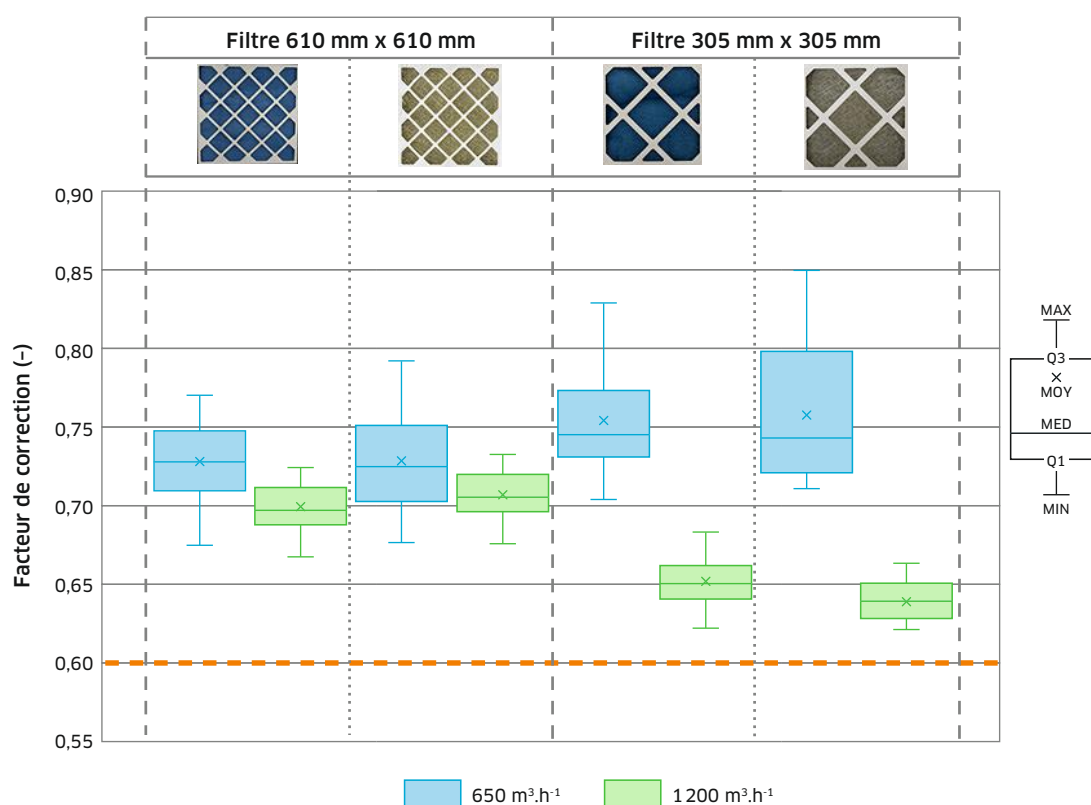


FIGURE 6 →
Balomètres
utilisés pour la
mesure du débit.





← FIGURE 7
Facteur de correction mesuré en fonction du débit d'air et du type de préfiltre, présenté sous forme de « boîtes à moustaches » (Q1 : 25 % des données ont une valeur inférieure ; MED : médiane ; MOY : moyenne ; Q3 : 25 % des données ont une valeur supérieure).

Étude paramétrique

En complément des tests précédents, une étude paramétrique a été menée pour évaluer la robustesse de la méthode de mesure. Les différents paramètres considérés sont les suivants :

- la qualité du filtre (Cf. Figure 3) : corps filtrant en fibres de verre (filtre G3), corps filtrant synthétique (filtre G4) ;
- les dimensions du filtre : 305 mm x 305 mm, 610 mm x 610 mm (référence du constructeur) ;
- trois opérateurs différents ;
- le débit de ventilation : environ 650 m³.h⁻¹, environ 1200 m³.h⁻¹ ;
- la distance de la mesure : anémomètre contre le préfiltre, anémomètre placé à 5 cm du préfiltre ;
- la durée de la mesure : 6 secondes, 20 secondes, 40 secondes ;
- l'appareil de mesure : anémomètre à hélice, balomètre.

Résultats

Calcul du facteur de correction

Dans le cas particulier des chantiers de désamiantage, l'objectif est d'éviter toute fuite de fibres vers l'extérieur. De ce fait, les débits d'air mis en jeu doivent obligatoirement atteindre au minimum les valeurs de dimensionnement définies lors du bilan aéraulique prévisionnel. De façon à ce que le débit réel ne puisse pas être inférieur au débit d'air mesuré au niveau du préfiltre, le facteur de correction à retenir doit correspondre à

la valeur minimale obtenue lors des mesures. De cette manière, le débit d'air mesuré au niveau du préfiltre est légèrement sous-évalué par rapport au débit réel.

Les mesures au niveau du filtre ont été réalisées à deux débits différents pour deux types de pré-filtres. La Figure 7 fournit les valeurs de facteur de correction obtenues. Au total, pour chaque débit et chaque type de filtres, entre 20 et 30 mesures ont été réalisées par deux ou trois opérateurs. Bien que de larges différences puissent être constatées, le facteur de correction est toujours supérieur à 0,6 pour toutes les mesures réalisées, un minimum de 0,62 étant atteint pour les préfiltres de dimensions 305 mm x 305 mm à un débit de 1200 m³.h⁻¹. La méthode de calcul du débit d'air consistant à appliquer un coefficient de 0,6 à la mesure de débit réalisée au niveau du filtre est donc adaptée pour ce type d'applications³.

Par ailleurs, mesurer au niveau du filtre une valeur de débit supérieure au débit de référence n'est pas surprenant. En effet, comme le montre la Figure 3, la surface de passage de l'air est inférieure à la surface totale du filtre (environ 35 % plus faible), d'où la nécessité d'introduire l'utilisation du facteur de correction. Pour davantage de praticité, la surface totale du filtre est considérée dans le calcul du débit, amenant par conséquent un débit surestimé par rapport à la référence. Une analyse plus approfondie des résultats permet de constater des différences suivant le débit d'air





© Fabrice Dimier pour l'INRS / 2023

Dépose de sacs de déchets amiantés sur un chantier de désamiantage.

Une analyse plus approfondie des résultats permet de constater des différences suivant le débit d'air et la taille du préfiltre, alors que le type de préfiltre a un impact limité (Cf. Figure 7). En effet, pour les préfiltres de dimensions 610 mm x 610 mm, une plus grande disparité des valeurs de facteurs de correction est constatée pour le plus faible débit, même si la valeur moyenne de ces facteurs reste semblable. Pour les préfiltres de plus petite taille, les résultats obtenus sont différents, avec une influence du débit d'air plus marquée, notamment pour le débit élevé où les valeurs de facteur de correction les plus faibles sont atteintes. La

disparité des valeurs peut paraître élevée mais il est important de rappeler que le positionnement de la mesure est contraint et non optimal. Il ne s'agit pas ici d'obtenir une valeur de débit la plus proche possible de la référence mais de s'assurer que le débit mesuré n'est pas inférieur au débit de référence, tout en évitant un dimensionnement excessif de la ventilation.

Robustesse de la méthode

Une étude paramétrique a été réalisée afin d'évaluer l'impact de certains paramètres clés sur les valeurs mesurées.

TABEAU 1 →
Coefficient correcteur en fonction du positionnement de la mesure.

	BALAYAGE CONTRE LE FILTRE	BALAYAGE À 5 CM DU FILTRE
Débit mesuré (m ³ .h ⁻¹)	878	423
Coefficient de variation (%)	2	8
Coefficient correcteur	0,7	1,5

TABEAU 2 →
Influence de l'opérateur sur la mesure.

COEFFICIENT CORRECTEUR	OPÉRATEUR 1	OPÉRATEUR 2	OPÉRATEUR 3	ÉCART (%)
Filtre G4 (grand modèle)	0,71	0,74	0,74	5
Filtre G3 (grand modèle)	0,73	0,76	0,70	8
Filtre G4 (petit modèle)	0,79	0,73	0,75	8
Filtre G3 (petit modèle)	0,81	0,72	0,76	11

	RAPIDE (7 SECONDES)	MOYEN (20 SECONDES)	LENT (40 SECONDES)
Débit mesuré (m ³ .h ⁻¹)	947	947	952
Coefficient de variation (%)	4	4	2
Coefficient correcteur	0,67	0,67	0,67

← TABLEAU 3
Influence de la
durée du balayage.

	BALOMÈTRE TESTO		BALOMÈTRE MK2	
Débit mesuré (m ³ .h ⁻¹)	567	1017	592	933
Débit de référence (m ³ .h ⁻¹)	578	1084	591	927
Coefficient de variation (%)	0,4	0,4	1,2	0,9
Écart avec débit de référence (%)	1,9	6,2	0,2	0,6

← TABLEAU 4
Résultats
de mesures en
utilisant
un balomètre.

→ Positionnement de l'anémomètre à hélice

L'impact de la distance entre le filtre (type G3, dimensions 305 mm x 305 mm) et l'anémomètre a été évalué par deux séries de 10 mesures : la première série a été réalisée en positionnant l'appareil de mesure contre le filtre, la deuxième en plaçant ce même appareil à 5 cm du filtre. Le balayage était identique à celui présenté sur la Figure 4 et le débit d'air fixé à 635 m³.h⁻¹ environ. Les résultats présentés dans le Tableau 1 correspondent à la moyenne des 10 mesures réalisées pour chaque méthode.

L'éloignement de l'anémomètre à hélice implique logiquement une diminution de la vitesse mesurée et donc implicitement du débit, d'un facteur 2 environ. L'écart avec le débit de référence est ainsi augmenté (facteur de 1,5) et l'utilisation d'un coefficient correcteur de 0,6 n'est plus envisageable, sous peine d'une large sous-estimation du débit ce qui entraînerait un dimensionnement excessif de la ventilation. Par ailleurs, le coefficient de variation (ou écart-type relatif), faible lorsque le balayage est réalisé contre le filtre, devient quatre fois plus important pour une position de mesure plus éloignée du filtre, indiquant une plus grande disparité des résultats. Cette position de mesure « dans le vide » apparaît donc incertaine et ne doit pas être utilisée. Les mesures doivent donc être réalisées en positionnant l'anémomètre contre le filtre. Par ailleurs, il est impératif de démarrer la mesure après stabilisation de la vitesse lue sur l'anémomètre à hélice afin d'éviter une sous-estimation de la valeur moyenne de vitesse.

→ Répétabilité de la méthode de mesure

La répétabilité de la méthode de mesure (appareil de mesure contre le filtre) a été évaluée via le coefficient de variation, qui est calculé pour chacune des séries de 10 mesures réalisées par un même opérateur. Toutes les configurations de mesure ont été analysées : type de filtre,

dimensions du filtre, débit d'air, ce qui représente au total 10 séries de mesures. Le coefficient de variation est toujours inférieur à 3 %, montrant ainsi la dispersion limitée des valeurs et la répétabilité du protocole de mesure.

→ Effet de l'opérateur

Trois opérateurs ont réalisé des séries de 10 mesures sur les quatre types de filtres à un débit d'air d'environ 650 m³.h⁻¹. Les différents coefficients correcteurs moyens obtenus pour chaque configuration sont présentés dans le Tableau 2. L'écart maximal entre les opérateurs atteint 11 %, avec toutes les valeurs de coefficient correcteur supérieures à 0,6 (Cf. Figure 7). On remarque une légère influence de la taille du filtre avec des écarts entre opérateurs supérieurs pour les filtres de plus faibles dimensions.

→ Effet de la durée du balayage

Trois séries de 10 mesures ont été réalisées avec des durées différentes de balayage de l'anémomètre à hélice contre le filtre (type G3, dimensions 305 mm x 305 mm). Le débit de référence était fixé à 635 m³/h. Les résultats du Tableau 3 indiquent que le paramètre de la durée du balayage a un impact limité sur les résultats. On peut toutefois constater qu'un balayage long tend à réduire la dispersion des résultats.

Utilisation du balomètre

Le balomètre mesure directement la valeur du débit d'air, ce qui présente l'avantage de ne pas avoir de coefficient correcteur à appliquer, contrairement à la méthode précédente. Les mesures ont été réalisées sur le filtre de type G4, de dimensions 610 mm x 610 mm à deux débits différents. Les résultats sont fournis dans le Tableau 4. L'utilisation d'un balomètre permet d'avoir une estimation du débit avec un écart inférieur à 6 % pour les deux appareils considérés.





© Fabrice Dimier pour l'INRS / 2023

Sas de transfert des matériels et déchets sur un chantier de désamiantage.

Par ailleurs, le coefficient de variation plus faible que la méthode précédente indique une dispersion très limitée des valeurs et donc une meilleure répétabilité. Le balomètre à compensation (référence MK2) présente logiquement des écarts plus réduits avec le débit de référence.

Conclusion

Sur un chantier de désamiantage, le contrôle des débits extraits est indispensable pour s'assurer de la conformité au dimensionnement prévu. La mesure ne peut être réalisée qu'au niveau du filtre d'extraction. Dans cette configuration particulière, deux méthodes de mesure ont été testées. La première (méthode actuellement utilisée) consiste à balayer la surface du filtre avec un anémomètre à hélice pour mesurer une vitesse moyenne. Le débit est ensuite calculé en considérant cette vitesse moyenne et la surface totale du filtre, le tout assorti d'un coefficient correcteur de 0,6. Les mesures réalisées ont permis de consolider la valeur de ce coefficient correcteur qui permet une estimation sécuritaire du débit. La mise en œuvre de cette méthode s'accompagne de quelques recommandations, notamment celles de veiller à acquérir les mesures après stabilisation de la valeur lue sur l'anémomètre, de bien positionner l'appareil de mesure contre le filtre et de réaliser la moyenne des valeurs sur toute la durée du balayage. La deuxième méthode de mesure consiste à utiliser un balomètre. Cet appareil permet une mesure directe du débit d'air, sans avoir de coefficient cor-

recteur à appliquer. Cette méthode de mesure est particulièrement fiable et répétable, mais l'appareil est plus encombrant et nécessite l'utilisation d'une jupe avec des dimensions adaptées au filtre. Il faut également veiller à acquérir la mesure après stabilisation de la valeur lue sur l'appareil et être rigoureux sur le positionnement de la jupe contre le filtre pour assurer une bonne étanchéité. Ces deux méthodes de mesure sont donc utilisables sur site pour évaluer le débit d'air au niveau d'un préfiltre dans la configuration d'un chantier de désamiantage. Si l'encombrement devant le filtre le permet, l'utilisation d'un balomètre est recommandée pour réduire les incertitudes liées à la mesure du débit. Bien que la réglementation ne mentionne pas cette méthode de mesure, son usage reste envisageable, étant donné que les appareils de mesures répertoriés dans l'arrêté du 20 décembre 2021 constituent une liste indicative. ●

1. Cette méthode de mesure est indiquée dans l'arrêté du 20 décembre 2021 [1]:

« À défaut de possibilité de mesure dans les conduits, les mesures sont réalisées par exploration du champ de vitesse dans les ouvertures. Le débit est alors déterminé en appliquant la formule suivante : $Q = k \cdot V \cdot S$. V : vitesse moyenne mesurée dans l'ouverture ; S : surface de la section totale de l'ouverture ; k : coefficient de correction caractéristique de l'ouverture ; de la méthode de mesure de la vitesse de l'air ; le cas échéant, des singularités situées à proximité de l'ouverture. On prendra 0,6 comme valeur maximale du coefficient k en l'absence d'information précise. »

2. Les dimensions 305 mm x 305 mm et 610 mm x 610 mm correspondent aux informations données par le constructeur. Les dimensions considérées dans le calcul correspondent à la zone balayée par l'anémomètre à hélice (intérieur du cadre).

3. Des questionnements sur la pertinence et l'origine de ce coefficient avaient été émis par des acteurs de la profession. En l'absence de document retraçant l'origine de ce coefficient, aucune réponse n'avait pu leur être apportée ; cette étude vise notamment à répondre à ces questionnements.

BIBLIOGRAPHIE

[1] ARRÊTÉ DU 20 DÉCEMBRE 2021 relatif aux conditions d'accréditation d'organismes et aux contrôles et mesures permettant de vérifier la conformité de l'aération et de l'assainissement des locaux de travail prescrits par l'agent de contrôle de l'inspection du travail. Accessible sur : <https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000044546689/2022-09-07/>

[2] DUBERNET F., GUICHARD R., ROMERO-HARIOT A. – Amiante. Aéraulique des chantiers sous confinement. INRS, brochure ED 6307, 2018. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%206307>

[3] NF EN ISO 5167-4 – Mesurage de débit des fluides au moyen d'appareils déprimogènes insérés dans des conduites en charge de section circulaire – Partie 4 : Tubes de Venturi. Afnor, 2022.

JOURNÉE
TECHNIQUE

POSTURES SÉDENTAIRES AU TRAVAIL

Tous concernés !

**Mardi
13 octobre
2026**

Uniquement diffusée
sur Internet



Dans de nombreuses activités, du **tertiaire** notamment, mais aussi de l'**industrie ou du transport, la posture assise est couramment rencontrée**. Dès lors qu'elle est maintenue dans le temps et associée à une faible dépense énergétique, cette posture sédentaire peut induire des conséquences délétères sur la santé. Souvent méconnus, les risques associés aux postures sédentaires représentent pourtant un **enjeu de santé au travail**. A ce titre, les entreprises doivent les intégrer dans leur démarche de prévention des risques professionnels.

Après avoir décrit ce qui caractérise les postures sédentaires, cette journée technique organisée par l'INRS abordera leurs **effets sur la santé** ainsi que les **actons possibles à mettre en œuvre** pour les prévenir. Les présentations se poursuivront par des retours d'expérience de différents acteurs ayant engagé une démarche de prévention des risques associés aux postures sédentaires.

Cette journée s'adresse à l'ensemble des acteurs de la santé et sécurité au travail en entreprises.

Inscription obligatoire : postures-sedentaires.inrs.fr

Contact : postures.sedentaires@inrs.fr



Base Colchic

La base de données d'exposition professionnelle aux agents chimiques et biologiques Colchic regroupe l'ensemble des mesures d'exposition effectuées sur les lieux de travail par les huit laboratoires interrégionaux de chimie (Lic) des Carsat/Cramif et les laboratoires de l'INRS. Elle est gérée par l'INRS et a été créée en 1987 à l'initiative de la Caisse nationale de l'assurance maladie (Cnam). À ce jour, Colchic compte plus d'un million de résultats pour 745 substances chimiques et agents biologiques.

PORTRAIT RÉTROSPECTIF DES EXPOSITIONS PROFESSIONNELLES DANS LES FONDERIES DE 2015 À 2024

Cet article présente un portrait rétrospectif des expositions professionnelles rencontrées dans les fonderies françaises entre 2015 et 2024, à partir des mesures enregistrées dans la base de données Colchic.

SARAH
BURZONI,
AUDREY
HUMBERT,
JEAN-
FRANÇOIS
SAUVÉ
INRS,
département
Métrologie
des polluants

Contexte

Une fonderie est une installation industrielle où sont fabriquées des pièces métalliques par coulée de métal en fusion dans des moules. Le métal (fonte, acier, aluminium, bronze, etc.) est fondu, versé, puis solidifié pour obtenir la forme souhaitée. Les procédés comprennent notamment la préparation des moules, la fusion, la coulée, le démoulage et les finitions (ébavurage, usinage, traitement thermique...). Les fonderies produisent des pièces pour de nombreux secteurs d'activité : automobile, aéronautique, énergie, mécanique, etc. Elles peuvent être spécialisées par type de métal ou par technique (moulage au sable, sous pression, en cire perdue...). Au travers des activités réalisées dans les fonderies, les travailleurs peuvent être exposés à divers contaminants tels des métaux lourds (plomb, chrome, nickel, manganèse, cadmium, arsenic...), des poussières minérales, des composés organiques volatils (isocyanates, amines, phénol, styrène, benzène, toluène, xylène...), des hydrocarbures polycycliques aromatiques (HAP) et des gaz de combustion (monoxyde de carbone) [1,4].

Selon l'Urssaf, en 2024, plus de 18 000 travailleurs appartenant à 288 établissements de production étaient rattachés au secteur d'activité de la fonderie (NAF 24.5) [5]. Ce secteur comprend les fonderies de fonte (NAF 24.51Z), d'acier (NAF 24.52Z), de métaux légers (NAF 24.53Z) et d'autres métaux non ferreux (NAF 24.54Z).

Entre 2019 et 2023, le nombre de maladies professionnelles (MP) dans le secteur de la fonderie est passé de 210 en 2019 à 164 en 2023, soit une diminution d'environ 22 % en cinq ans. L'ensemble montre une tendance générale à la baisse avec des disparités selon les activités de fonderie, mais le secteur 24.51Z reste le plus contributeur. Après une baisse marquée entre 2019 et 2020, le nombre de MP est resté relativement stable entre 2020 et 2022, avant de décroître en 2023 [6].

Sur les 164 MP reconnues en 2023, la proportion liée à des troubles musculosquelettiques (TMS) représente 77 %, 21 % concernent les agents chimiques et 2 % des MP hors tableaux [6]. Parmi les reconnaissances de MP portant sur les TMS,

Un biais d'interprétation est susceptible d'être introduit lors de l'exploitation des bases de données nationales d'exposition professionnelle telles que Colchic. En effet, ces bases n'ont pas été conçues dans le but d'être représentatives de l'ensemble des travailleurs ou d'un secteur professionnel donné.



© Gaël Kerbaol / INRS / 2024

celles au titre du tableau n° 57 « Affections périarticulaires » sont très majoritaires (90 %). Les MP au titre des tableaux n° 79 « Lésions chroniques du ménisque », n° 97 « Affections chroniques du rachis lombaire provoquées par les vibrations de basses et moyennes fréquences transmises au corps entier », n° 98 « Affections chroniques du rachis lombaire provoquées par la manutention manuelle de charges lourdes » sont moins fréquentes (10 %). Parmi les MP liées à l'exposition à des agents chimiques (21 %), les reconnaissances relevant du tableau n° 30A « Affections professionnelles consécutives à l'inhalation de poussières d'amiante » sont majoritaires, représentant 56 % des cas. Les reconnaissances au titre du tableau n° 25 « Affections dues à la silice cristalline, aux silicates cristallins, au graphite ou à la houille » constituent 24 % des cas, tandis que celles relevant du tableau n° 30B « Cancer broncho-pulmonaire provoqué par l'inhalation de poussières d'amiante » en représentent 18 %. Des atteintes auditives provoquées par les bruits lésionnels (tableau n° 42) sont moins fréquentes (1 %). Depuis 2019, trois affections relevant du tableau n° 44 « Affections consécutives à l'inhalation de

poussières minérales ou de fumées, contenant des particules de fer ou d'oxyde de fer » ont été reconnues.

Afin de caractériser les niveaux d'exposition aux substances chimiques dans le secteur de la fonderie, cet article présente une analyse descriptive des concentrations enregistrées dans la base de données Colchic entre 2015 et 2024. Ces données concernent les travailleurs employés dans des entreprises relevant du secteur de la fonderie.

Les données exploitées ont été restreintes aux mesures individuelles, prélevées dans la zone respiratoire des travailleurs pour des durées comprises entre 60 et 600 minutes, et conformes aux méthodes de prélèvement et d'analyse validées, telles que celles référencées dans la base MétroPol [7]. Pour les substances disposant d'une valeur limite d'exposition professionnelle sur huit heures (VLEP-8h), des indices d'exposition (IE) ont été calculés afin de faciliter la comparaison des niveaux d'exposition entre les différentes substances chimiques et activités.

Le calcul de l'IE correspond au rapport entre la concentration mesurée et la VLEP-8h de la substance considérée, en vigueur au 31 décembre 2025.

Fonderie de fonte : bascule du contenu de la poche vers les moules où sont formées les pièces.



TABEAU 1 →
Nombre de résultats par secteur d'activité et substances les plus fréquemment mesurées dans la base Colchic.

SECTEUR	NOMBRE DE RÉSULTATS DE PRÉLÈVEMENTS INDIVIDUELS	NOMBRE DE SUBSTANCES	SUBSTANCES LES PLUS MESURÉES
24.51Z : Fonderie de fonte	403	35	Silice cristalline, formaldéhyde, xylène, éthylbenzène
24.52Z : Fonderie d'acier	139	27	Silice cristalline, toluène, poussières totales ¹ , hydrocarbures C6-C12
24.53Z : Fonderie de métaux légers	251	28	Silice cristalline, poussières totales ¹ , manganèse ² , aérosol de fluide d'usinage ³
24.54Z : Fonderie d'autres métaux non ferreux	141	11	Poussières totales ¹ , silice cristalline, béryllium, manganèse ²

1. Poussières totales exprimées en fraction inhalable ; 2. Manganèse et ses composés exprimés en fraction inhalable ; 3. Fraction inhalable.

Un IE supérieur à 1 indique un dépassement de la VLEP-8h.

Concernant les poussières de silice, un indice d'exposition spécifique a été établi à partir des concentrations en poussières alvéolaires, en quartz et en cristobalite [8]. Les valeurs inférieures à la limite de quantification (LQ) ont été remplacées par LQ/2 dans les calculs statistiques.

Fonderie de fonte : versement depuis le four dans une poche.

Les substances dont le nombre de résultats de mesures est inférieur à 10 sont regroupées dans la catégorie « Autres substances » sur la *Figure 1*. Les couples « substance-tâche » dont le nombre de résultats de mesures est inférieur à 10 sont regroupés dans la catégorie « Autres substances / tâche » sur la *Figure 2*.

État des lieux des données Colchic

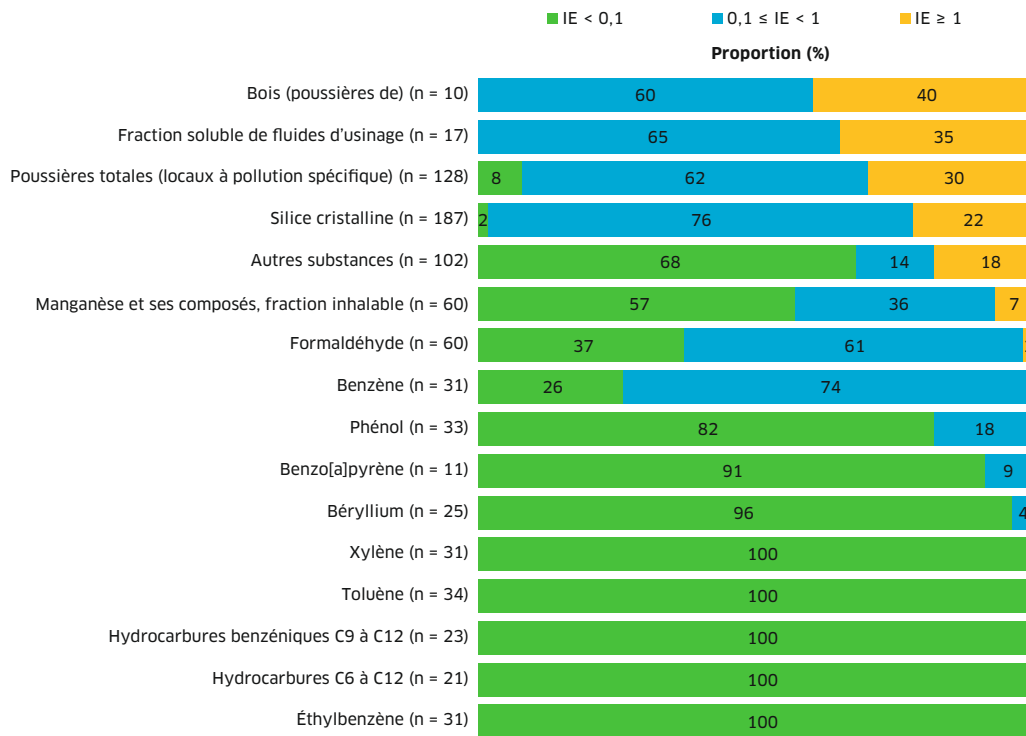
Après application des critères de sélection métrologiques définis dans la section précédente, 934 prélèvements individuels relatifs aux activités de fonderie ont été identifiés dans la base Colchic pour la période 2015-2024. Le *Tableau 1* synthétise la répartition des résultats par secteur ainsi que les substances les plus fréquemment mesurées dans chacun d'entre eux.

Au total, 57 agents chimiques ont été recensés dans les données de la base Colchic, parmi lesquels 21 substances disposaient d'au moins 10 mesures. La silice cristalline constitue la substance la plus fréquemment mesurée (187 résultats, dont plus de 90 % étaient supérieurs à la LQ). Les autres polluants les plus fréquemment mesurés incluent les poussières totales, le formaldéhyde, les composés du manganèse en fraction inhalable. La *Figure 1* présente la distribution des IE par agent chimique pour les prélèvements individuels. La *Figure 2* représente la distribution des IE par agent chimique en fonction de la tâche effectuée par l'opérateur pendant le prélèvement.

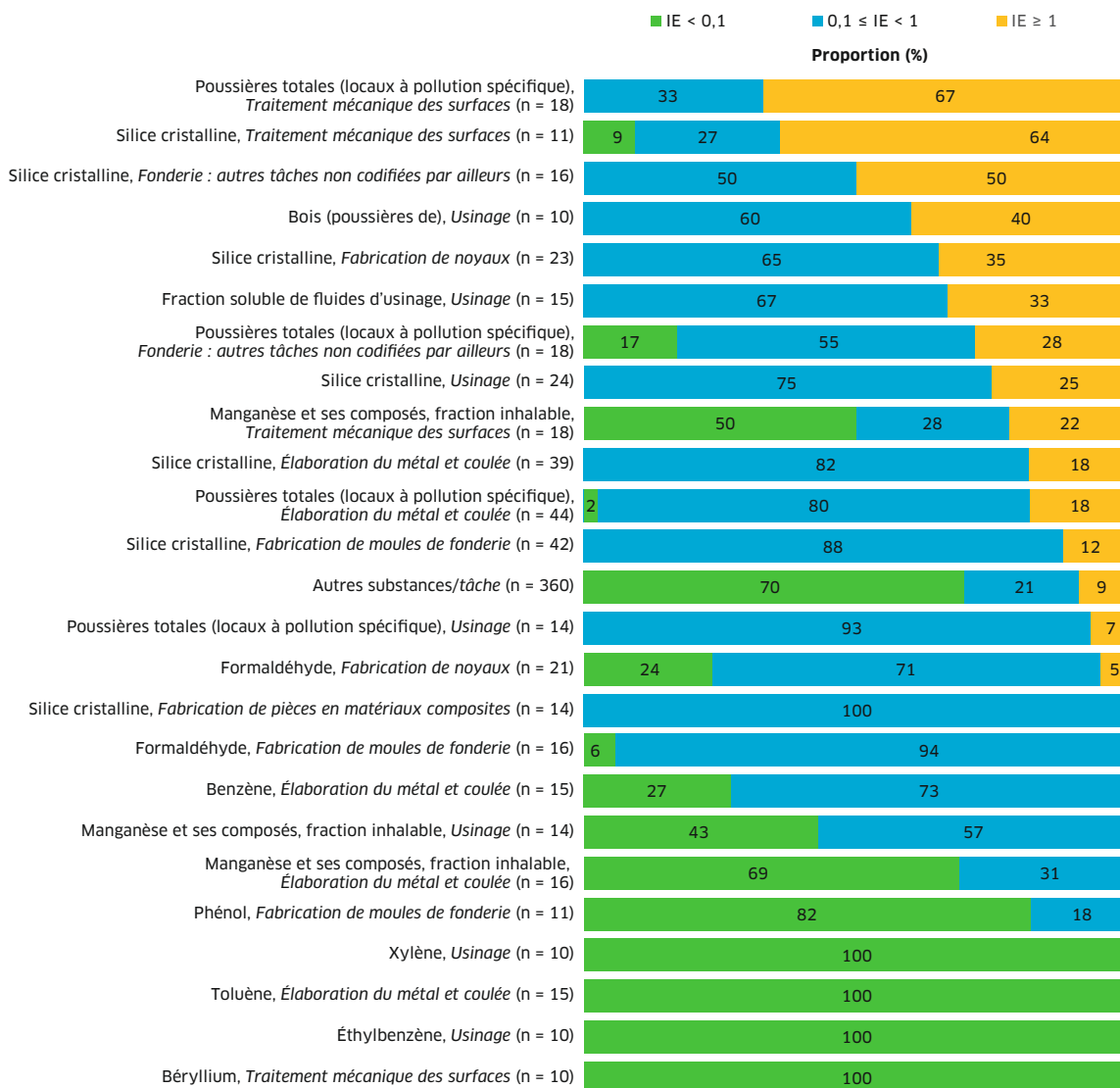
Parmi les 21 substances disposant d'au moins 10 mesures, six présentent au moins un dépassement de la VLEP-8h. Les proportions de dépassement les plus élevées sont observées pour les poussières de bois (40 %), dont l'ensemble des mesures est associé à des tâches d'usinage (cf. *Figure 2*), la fraction soluble (dans l'eau) des fluides d'usinage (35 %), les poussières totales dans les locaux à pollution spécifique (30 %) et la silice



© Gael Kerbaol / INRS / 2024



← FIGURE 1
Distribution des indices d'exposition (IE) par substance entre 2015 et 2024 (n ≥ 10).



← FIGURE 2
Distribution des indices d'exposition (IE) par couple substance-tâche entre 2015 et 2024 (n ≥ 10).



SUBSTANCES	SECTEURS				EFFETS ADDITIFS									EFFETS NON ADDITIFS			
	Acier	Autres métaux non ferreux	Fonte	Métaux légers	Atteintes cutanées	Atteintes des voies respiratoires inférieures	Atteintes des voies respiratoires supérieures	Atteintes du système auditif	Atteintes du système hématopoïétique	Atteintes du système immunitaire	Atteintes du système nerveux central	Atteintes hépatiques	Atteintes oculaires	Atteintes rénales et de l'appareil urinaire	Atteintes sur le développement du fœtus, de l'embryon et/ou de l'enfant	Cancérogènes et/ou mutagènes	Sensibilisants
Benzène	X		X		X				X	X			X			X	
Béryllium		X	X		X	X	X						X			X	X
Éthylbenzène	X		X				X	X			X			X		X	
Formaldéhyde	X	X	X	X	X		X						X			X	X
Manganèse et ses composés (fraction inhalable)	X	X	X	X		X					X						
Phénol	X	X	X		X	X	X				X	X	X	X		X	
Poussières totales (locaux à pollution spécifique)	X	X	X	X		X	X						X				
Silice cristalline	X	X	X	X		X										X	
Toluène	X		X		X			X			X				X		
Xylène	X		X		X	X	X	X			X		X				

↑ **TABLEAU 2**
 Liste des 10 substances présentes dans l'outil MiXie ayant le plus grand nombre de mesures dans la base de données Colchic pour le secteur de la fonderie, mesurées pour les quatre secteurs d'activité et les classes d'effets toxicologiques associées.

cristalline (22 %). Les opérations de fabrication de noyau et de moule de fonderie impliquent spécifiquement le formaldéhyde avec des expositions pouvant dépasser la VLEP-8h. Quant à l'exposition des travailleurs aux hydrocarbures, elle demeure inférieure à 10 % des VLEP-8h. Parmi les substances regroupées dans la catégorie « Autres substances » en raison d'un nombre de mesures inférieur à 10, des concentrations supérieures à la VLEP-8h sont observées pour le cadmium, le chrome hexavalent, le dioxyde de soufre et le monoxyde de carbone. Les résultats présentés dans la *Figure 2* mettent

en évidence que plusieurs tâches dans le secteur de la fonderie sont susceptibles d'exposer les travailleurs à plusieurs substances chimiques différentes. L'outil MiXie France [9] permet de faciliter l'identification des atteintes à la santé associées à des polyexpositions chimiques. Le *Tableau 2* présente les 10 substances répertoriées dans MiXie ayant le plus grand nombre de mesures dans la base Colchic pour le secteur de la fonderie, accompagnées de leurs classes d'effet. Ces effets toxicologiques peuvent être soit additifs, avec le calcul de l'indice d'exposition à des effets additionnels

par l'outil MiXie, soit non additifs, pour les effets cancérigènes, mutagènes, reprotoxiques et sensibilisant. Les effets les plus fréquemment engendrés par ces substances sont les atteintes des voies respiratoires inférieures et supérieures, des yeux et de la peau, ainsi que des effets cancérigènes et/ou mutagènes.

Une autre situation marquée de polyexposition potentielle concerne les procédés de traitement mécanique des surfaces, qui peuvent engendrer des niveaux d'exposition élevés aux poussières totales et à la silice cristalline, ainsi qu'une exposition, plus faible mais non négligeable, au béryllium. Là encore, la combinaison de ces agents peut générer des effets délétères sur la santé, notamment des atteintes respiratoires, oculaires ou cutanées.

Discussion

L'exploitation des données de la base Colchic pour la période 2015-2024 met en évidence que les travailleurs des fonderies peuvent être exposés à une grande variété de substances chimiques, dont certaines classées cancérigènes, mutagènes ou reprotoxiques (CMR). Par ailleurs, selon la tâche réalisée par le travailleur, des expositions à de multiples substances chimiques peuvent survenir, ce qui requiert la prise en compte de la polyexposition dans l'évaluation du risque chimique. Même lorsque les indices d'exposition sont inférieurs à 1 – indiquant que les concentrations mesurées restent en dessous des VLEP-8h –, le risque sanitaire à long terme ne peut être exclu. Cela est particulièrement vrai pour certains agents CMR, pour lesquels aucun seuil de danger ne peut être établi : même à très faible dose, un risque subsiste.

La silice cristalline, un cancérigène avéré pour l'humain, représente la substance la plus fréquemment mesurée dans le secteur de la fonderie dans les données extraites de Colchic, et près d'un résultat de mesure sur quatre dépasse la VLEP-8h réglementaire. Ces données montrent que le niveau d'exposition peut être élevé lors d'opérations telles que le dessablage, le meulage, le traitement mécanique des surfaces et l'usinage, ce qui pourrait s'expliquer par un captage insuffisant, absent ou obstrué. À noter que pour les postes de décochage par exemple, des systèmes de ventilation et de captage localisé sont préconisés par l'INRS [10]. Sur l'ensemble des 187 mesures de silice cristalline identifiées, 111 (60 %) ont été prélevées sur des postes de travail sans moyens de protection collective. Toutefois, les proportions de dépassement étaient similaires indépendamment de la présence ou non de système de captage, soit 21 % en l'absence de captage, 21 % en présence de captage localisé et 20 % en présence de captage inducteur. Ainsi, la présence de dispositifs de captage n'est pas nécessairement suffisante pour diminuer les concentrations à des

niveaux inférieurs à la VLEP, et le port de protection individuelle peut être nécessaire pour prévenir les risques d'exposition à la silice cristalline.

Des dépassements fréquents de la VLEP-8h sont aussi observés pour les poussières de bois, bien que seulement 10 mesures aient été enregistrées dans la base Colchic. Toutes ces mesures sont associées à des tâches d'usinage, plus particulièrement de sciage ou de rabotage de bois dans des ateliers de modelage. Classées cancérigènes pour l'homme (CMR catégorie 1A selon le règlement CLP¹ et groupe 1 selon le Circ²), ces poussières peuvent provoquer, en cas d'exposition répétée ou prolongée, des atteintes respiratoires chroniques, des irritations oculaires et cutanées, ainsi que des risques de cancers naso-sinusiens. Ces dépassements sont observés malgré la présence de systèmes de captage des poussières, un constat partagé par une analyse précédente de la base Colchic portant spécifiquement sur les poussières de bois [11]. Ainsi, le port d'équipement respiratoire peut être nécessaire

Fonderie d'aluminium :
poste de découpe
au plasma.



© Philippe Cestano pour l'INRS / 2023

dans ces conditions ; par ailleurs, l'ensemble des 10 mesures a été prélevé sur des travailleurs équipés de protection respiratoire appropriée.

Le formaldéhyde, utilisé comme agent de réticulation de certains liants, notamment dans le procédé furanique-phénolique pour la fabrication des noyaux et des moules, constitue également un enjeu majeur [12]. Classé selon le CLP cancérigène de catégorie 1B et mutagène de catégorie 2, le formaldéhyde est soumis à des VLEP réglementaires renforcées depuis 2021, avec une VLEP-8h de 0,37 mg/m³. Les IE observés dans Colchic montrent des dépassements potentiels lors des opérations directes de fabrication, rappelant la nécessité d'un captage performant et d'une ventilation spécifique.

Les niveaux d'exposition aux hydrocarbures aromatiques monocycliques (éthylbenzène, toluène...) étaient globalement relativement faibles par rapport aux VLEP-8h en vigueur. Parmi ces substances, les indices d'exposition les plus élevés relevés concernent le benzène (classé cancérigène de catégorie 1A et mutagène de catégorie 1B selon le CLP). Néanmoins, aucune concentration mesurée ne dépassait la VLEP-8h actuelle. Cependant, la révision réglementaire abaissant la VLEP-8h de 1,65 mg/m³ à 0,66 mg/m³ à compter du 6 avril 2026 entraînerait un taux de dépassement de 13 %.

En général, les indices d'exposition concernant les métaux lourds (manganèse, béryllium...) sont relativement faibles comparativement aux substances mentionnées ci-dessus. Toutefois, des niveaux d'exposition plus élevés pouvant parfois dépasser la VLEP-8h sont observés pour certaines tâches,

par exemple pour le manganèse lors d'opérations impliquant la manipulation ou la projection de poudres métalliques.

Les postes d'usinage, de traitement mécanique et de fabrication de noyaux et de moules peuvent entraîner une polyexposition aux hydrocarbures C₆-C₁₂ et benzéniques, aux poussières, à la silice et à divers métaux. Cette combinaison de substances augmente les risques de pathologies chroniques, soulignant l'importance d'une évaluation et d'une prévention spécifiques de ces situations de polyexposition.

Ces observations montrent que, même lorsque les résultats de mesures restent inférieurs aux VLEP-8h réglementaires, la présence d'agents CMR, les dépassements ponctuels et la polyexposition imposent une vigilance maximale. Elles justifient la mise en œuvre de mesures de prévention hiérarchisées : identification systématique des mélanges de substances et des tâches multi-exposantes ; substitution des substances dangereuses lorsque cela est techniquement possible ; optimisation des procédés pour réduire les émissions et privilégier des techniques moins polluantes ; captage à la source et ventilation générale adaptés ; priorité à la protection collective sur le port d'équipements de protection individuelle ; traçabilité des expositions *via* fiches et archives ; surveillance médicale spécifique incluant suivi pneumologique, dermatologique, neurologique et suivi sur le long terme pour les expositions aux substances CMR. ●

1. Règlement européen relatif à la classification, à l'étiquetage et à l'emballage des substances et des mélanges.
2. Centre international de recherche sur le cancer.

BIBLIOGRAPHIE

[1] COOKE J. ET AL. – *Exposure to substances hazardous to health in foundries*. Health and Safety Executive, 2017.

[2] ZAKARIA A., EL-MAGHRABI G. – Assessment of occupational exposures in foundries. *Journal of the Egyptian public health association*, 2003, 78 (3-4), pp. 245-264.

[3] IARC WORKING GROUP ON THE EVALUATION OF CARCINOGENIC RISKS TO HUMANS – *Chemical agents and related occupations*. Circ/Iarc, coll. Monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans, 2012, 100F.

[4] FREIRE B.M. ET AL. – Occupational exposure to potentially toxic elements in the foundry industry: an integrated environmental and biological monitoring. *Environmental science and pollution research*, 2021, 28 (26), pp. 34630-34641.

[5] UNION DE RECOUVREMENT DES COTISATIONS DE SÉCURITÉ SOCIALE ET D'ALLOCATIONS FAMILIALES (URSSAF) – *Effectifs salariés et nombre d'établissements dans le secteur privé (régime général)*. 2025. Accessible sur : <https://open.urssaf.fr/pages/dataviz-etablissements-et-effectifs-salaries/>

[6] ASSURANCE MALADIE – *Fiches de sinistralité. Naf niveau 5 : 24.51Z, 24.52Z, 24.53Z et 24.54Z*. 2024. Accessible sur : https://www.assurance-maladie.ameli.fr/sites/default/files/ape-naf/NAFAPE_2023_C_000_2451Z_SY.pdf

[7] INRS – *Base de données MétroPol*. 2025. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/publications/bdd/metropol.html>

[8] INRS – *Silice cristalline et santé au travail*. Dossier Web, 2022. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/risques/silice-cristalline/ce-qu-il-faut-retenir.html>

[9] INRS – *MiXie. Un logiciel pour évaluer les multiexpositions aux substances chimiques*. Outil n° 45, 2024. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=outil45>

[10] INRS – *Ventilation des postes de décochage en fonderie*. Guide pratique de ventilation n° 4, ED 662, 2003. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%20662>

[11] SAUVÉ J.F., MATER G. – Portrait rétrospectif des expositions aux poussières de bois en France de 2015 à 2024. *Hygiène & sécurité du travail*, 2025, 280, pp. 84-88. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=BD%2029>

[12] INRS – *Fonderies de fonte et d'acier*. Coll. Fiches d'aide au repérage (FAR) des cancérigènes, FAR n° 20, 2015. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=FAR%2020>

Protégeons-nous



**MOINS
FORT
LE BRUIT**



Institut national de recherche et de sécurité pour la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles - 65 bd Richard-Lenoir 75011 Paris - www.inrs.fr - Designer graphique : Éva Minem - © INRS 2020 - AD 837

Découvrez nos affiches sur les risques
liés aux nuisances sonores

Pour en savoir plus :
www.inrs.fr/affiches-bruit





Agenda & services

Congrès

Machines : agir en prévention
tout au long du cycle de vie
P. 97

Agenda/Événements
P. 102

Formation

Vibrations au travail : se former pour prévenir
un risque professionnel aux effets irréversibles
P. 104

Agenda/Formations
P. 108

Sélection bibliographique

À lire, à voir
P. 110

Congrès

MACHINES: AGIR EN PRÉVENTION TOUT AU LONG DU CYCLE DE VIE

Compte rendu de la journée technique organisée par l'INRS le 25 mars 2025

Centrée sur l'utilisation de la machine tout au long de son cycle de vie, cette journée technique a mis l'accent sur les risques et leur prévention du point de vue de l'utilisateur, lors de quatre sessions. Différents acteurs de la prévention des risques ont présenté le cadre réglementaire, les bonnes pratiques et plusieurs retours d'expérience.

MACHINES: ACTING FOR PREVENTION THROUGHOUT THEIR LIFECYCLE – This technical day centred on the use of machines throughout their lifecycle. Over four sessions, presentations focused on machine-related risks and their prevention from the user's perspective. Various stakeholders in risk prevention presented the regulatory framework, good practices and several returns on experience.

JEAN-CHRISTOPHE
BLAISE
INRS,
département
Ingénierie
des
équipements
de travail

Introduction de la journée

Omniprésentes, notamment dans l'industrie, les machines peuvent être plus ou moins complexes, mais elles ont toutes en commun d'utiliser de l'énergie pour la transformer en mouvement, les rendant, de ce fait, génératrices de risques pour les salariés. Ces risques sont principalement mécaniques mais, selon le procédé mis en œuvre, les machines sont également sources de diverses nuisances physiques, de troubles musculosquelettiques (TMS), de risques chimiques, biologiques, etc.

À chacune des étapes du cycle de vie d'une machine (conception, acquisition, exploitation, maintenance, modification...), les entreprises utilisatrices de machines ont un rôle clé à jouer pour prévenir les risques professionnels. Cette journée technique, organisée en mode hybride, a rassemblé plus de 2000 inscrits – dont plus de 150 participants en présentiel – intéressés par les risques et les mesures de prévention à mettre en place tout au long de la vie d'une machine. Les 13 présentations réparties en quatre temps intégrant des moments d'échanges sont disponibles sur le site de l'INRS [1].

Le risque machines : de quoi parle-t-on ?

Jean-Christophe Blaise et Séverine Demasy (INRS) ont délimité les contours de cette journée, en rappelant la forte variabilité de la dénomination de machines – d'un outil électroportatif à une ligne d'imprime-

rie automatisée, sans oublier les machines mobiles telles que des chariots automoteurs ou encore les engins de chantier. Ces machines sont utilisées dans de nombreux secteurs, industriels bien sûr, mais pas uniquement. Après avoir rappelé que les machines génèrent de nombreux risques professionnels et pas seulement mécaniques, les intervenants ont présenté des éléments statistiques sur la sinistralité. Puis, en s'appuyant sur des exemples d'accidents du travail, ils ont souligné une autre variabilité, celle des usages, en concluant que la prévention du « risque machines » doit se faire tout au long de la vie de la machine.

Réglementation liée à l'utilisation

Marianne Le Moing (DGT) a présenté, également en introduction à cette journée, un point sur le cadre réglementaire dans lequel s'inscrit l'utilisation des machines et plus précisément les obligations qui incombent à l'employeur lorsqu'il s'équipe, installe, maintient sa machine et bien sûr lorsqu'il l'utilise. Après le nécessaire rappel des obligations du fabricant, la présentation s'est concentrée sur les obligations de l'employeur qui ne sont pas toujours connues ou respectées, au regard de la survenue de la majorité des accidents du travail. Le maintien en état a été plus particulièrement rappelé au travers des actions de maintenance et des vérifications, pour certaines obligatoires. En effet, des protecteurs casés, shuntés ou retirés sont à l'origine de nombreux





© Fabrice Dimier pour l'INRS / 2025

accidents et, au-delà de la réglementation, réaliser les actions de maintenance permet de déceler en temps utile toute détérioration susceptible de créer des risques.

Session 1 : Choisir une machine adaptée

La rédaction du cahier des charges

Bruno Daille-Lefèvre (INRS) a présenté la première étape incontournable : la rédaction du cahier des charges. Avant même de réfléchir aux aspects liés à la prévention des risques, il est primordial de bien définir les usages futurs de la machine, afin d'acquies la machine adaptée à ses besoins. C'est à partir de là que sont ensuite choisies les mesures de prévention des risques les plus adaptées. Sur la base de la brochure ED 6231 de l'INRS [2], il a été rappelé que la constitution d'une équipe pour la rédaction de ce cahier des charges est un élément indispensable ; elle doit intégrer tous les corps de métier qui seront concernés par l'utilisation de la machine, la production mais également la maintenance, la qualité, le nettoyage, etc.

Intégration de la sécurité machine dans les projets

Christophe Grim et Thomas Berthy (Société bretonne de volailles - Groupe LDC) ont illustré, à travers leur retour d'expérience, l'intégration de la prévention

des risques professionnels dans le cadre d'un projet de création d'un nouveau process dans un nouveau bâtiment. Ce projet mené sur la période 2021-2023 a mis en évidence l'importance de l'implication de l'ensemble des acteurs internes mais également des acteurs de la prévention, tels que la Carsat, dans un objectif d'amélioration des conditions de travail et d'intégration de la sécurité à la conception. Une fois passées les difficultés inhérentes à la mise en place de l'organisation du groupe projet, l'appropriation du projet par les acteurs a permis de faire fructifier les échanges et de satisfaire les besoins attendus avec une mise en service réussie.

Session 2 : Installer une machine

Que faut-il faire avant la mise en service ?

Séverine Demasy (INRS) a présenté les différentes étapes préalables à la mise en service d'une machine dès réception dans les ateliers. Il s'agit d'installer la machine selon les préconisations du fabricant, préconisations qui doivent se trouver dans la notice d'instructions, en veillant entre autres aux zones de circulation et espaces nécessaires pour les futures interventions. Les analyses associées à cette phase doivent permettre de compléter le document unique d'évaluation des risques professionnels de l'entreprise. Cette phase d'installation, souvent qualifiée de

chantier, doit également faire l'objet d'une analyse des risques particulière. L'étape de réception de la machine permet de s'assurer de sa conformité au cahier des charges et bien sûr à la réglementation ; à noter que cette réception peut déjà avoir débuté pour certains points en amont, c'est-à-dire sur plan ou sur l'équipement chez le fournisseur. La rédaction de l'ensemble de la documentation, en particulier celle des fiches de poste [3], et les formations à la machine viennent compléter cette phase de réception.

Accompagnement par un organisme

David Auffrere (Filiance) a rappelé les missions de Filiance, association professionnelle qui travaille aux côtés des pouvoirs publics et du Comité français d'accréditation (Cofrac¹). Parmi les adhérents de Filiance, on trouve les organismes d'inspection, acteurs en prévention des risques professionnels, notamment dans leurs actions de réception des machines neuves et de vérification générale périodique. Il a également présenté les missions d'accompagnement de ces organismes en mode projet sur tout ou partie du cycle de vie d'une machine (de l'avant-projet à la modification). En tant que fédération d'organismes tierce partie, elle ne se substitue pas au rôle des fabricants mais les accompagne lors des études, sans les réaliser. Quelques exemples d'accompagnements, cette fois auprès des utilisateurs, ont été mentionnés, tels que l'aide à la rédaction de cahier des charges en avant-projet, la validation de la fiabilité des systèmes de commande en étude détaillée ou encore l'évaluation de la conformité en réception de machine.

Les bonnes pratiques avant mise en service : retour d'expérience

Loïc Vannier et Alan Le Damany (Claas Tractor) ont illustré les propos de cette session par leurs retours d'expérience du déploiement d'un processus de mise en service d'une machine, répondant à un besoin de sécuriser les nouvelles installations. Dans le cadre d'un projet de modernisation sur la période 2017-2020, une méthode « acquisition de machine » a été formalisée au sein de l'entreprise. Cela s'est concrétisé par la description d'un processus intégrant les aspects prévention des risques professionnels, de l'étape de définition des besoins à celle de réception. Les clés de la réussite d'un tel projet ont été identifiées, telles que la création d'une fonction « référent sécurité machine », l'internalisation du pilotage du projet afin de maîtriser les interactions avec l'ensemble des parties prenantes, dont les opérateurs qui peuvent être accompagnés et formés.

Session 3 : Intervenir sur une machine

Comment sécuriser les interventions sur une machine

Sandrine Hardy (INRS) a rappelé que les interventions potentielles sur une machine étaient nom-

breuses et surtout variées, qu'elles concernaient de nombreux opérateurs (production, maintenance, nettoyage, qualité, etc.) et qu'elles les exposaient à de nombreux risques. À noter que les interventions hors production s'avèrent généralement les plus accidentogènes. Pourtant ces accidents ne sont pas une fatalité et des outils de prévention existent. Les interventions de maintenance nécessitent – malgré le caractère urgent de certaines d'entre elles – anticipation et préparation. Les principes généraux de prévention doivent s'appliquer, notamment en fiabilisant la machine pour réduire les interventions, en automatisant certaines tâches – aide au diagnostic, par exemple – et en effectuant de la maintenance prévisionnelle². Ensuite, il est important de sécuriser les interventions qui doivent être réalisées en prévoyant (à la conception, donc dans le cahier des charges) des modes de fonctionnement adaptés tels que des mouvements sécurisés, des énergies maîtrisées voire consignées [4]. Enfin, la capitalisation des retours d'intervention est une composante importante pour réaliser les interventions ultérieures en sécurité.

Démarche pour la maîtrise des énergies lors des interventions

Jean-Pierre Avellaneda (Apave) a introduit sa présentation par la prévention des accidents, en insistant sur le caractère complexe des risques liés à la maîtrise ou non des énergies et des fluides. Il a également rappelé que les opérations de maintenance surexposent les acteurs qui en ont la charge. Les facteurs de risques associés sont très nombreux ; ont été cités les enjeux de sécurité par rapport à la pression du quotidien, la formation des opérateurs, l'organisation de la maintenance et de ses processus [5], ainsi que la présence de nombreuses énergies là où souvent seule l'énergie électrique est identifiée. Pour cela, il a présenté la démarche HOT (Humain-organisationnel-technique) LOTO (TO) (*Lockout Tag out – Try out*), permettant la maîtrise des énergies, telle que prévue par la norme NF EN 17975 [6].

Mise en place de la démarche de maîtrise des énergies, retours d'expérience

Jean-Pierre Avellaneda (Apave) a illustré sa précédente présentation par des retours d'expérience terrain concernant la mise en œuvre de la démarche. Les clés de la réussite passent par la prise en compte des trois axes que sont les facteurs humains, organisationnels et techniques. Cette démarche est nécessairement adaptée au contexte de l'entreprise. Elle nécessite préalablement un diagnostic basé sur l'analyse des risques pour prioriser les actions et amorcer une gestion du changement. Enfin, sa mise en œuvre est forcément à envisager avec une perspective à moyen terme pour gagner à la fois en prévention des risques professionnels et en performance



industrielle. Il a insisté sur le fait que la maintenance ne peut être vue comme un coût, mais bien comme une source de profit à laquelle vient contribuer la prévention des risques professionnels.

Session 4 : Améliorer une machine

Améliorer sa machine n'est pas anecdotique

Hugues Fièvre (Carsat Centre Ouest) a soulevé la question fréquemment posée : ai-je le droit de modifier ma machine ? La réponse est « oui » : les utilisateurs peuvent modifier une machine, à condition de respecter certaines exigences, plus particulièrement en matière d'évaluation des risques liés à la modification, de ne pas dégrader le niveau de sécurité de la machine et d'établir un dossier de modification. On distingue deux types de modification : celles prévues par le fabricant de la machine dans la notice d'instructions et les autres. Il a présenté la brochure INRS ED 6289 [7] relative à l'amélioration des machines en service. Ce guide propose une démarche « projet » pour réaliser ces améliorations en focalisant sur l'analyse des risques, la prise en compte de l'état de la technique et donc de son évolution. Il insiste sur l'importance de tracer l'ensemble des analyses et actions effectuées, au moyen des plans et schémas des éléments modifiés, de la mise à jour de la documentation et des formations associées.

Amélioration des machines : retours d'expérience

David Inacio (Bureau Veritas) a présenté deux exemples d'amélioration de machines dans les domaines aéronautique et pharmaceutique. Il a rappelé que pour un ensemble de raisons, les entreprises ont la nécessité d'adapter et de faire évoluer leurs

procédés de production. L'acquisition de nouveaux équipements n'est pas toujours la réponse et la modification de l'outil existant peut être jugée préférable. Il a exposé comment son organisme met en œuvre des missions d'accompagnement des entreprises dans leurs projets, à travers notamment des audits de processus d'acquisition, d'accompagnement au changement, de formation, d'assistance à réception des machines, etc.

Les « nouveaux » risques machines à travers le nouveau règlement (UE) 2023/1230

Pierre Belingard (Eurogip) est revenu pour la dernière présentation de la journée sur la réglementation liée à la conception, en évoquant les nouveautés du futur règlement machines 2023/1230/UE qui remplacera la directive machines 2006/42/CE le 20 janvier 2027. Même s'il n'y a pas de nouveaux risques à proprement parler, le règlement introduit de nouvelles exigences, en tout cas les identifie, concernant principalement l'intelligence artificielle, la cybersécurité et les machines mobiles autonomes. Ces nouvelles exigences seront bien sûr à prendre en compte par le fabricant de la machine, mais les futurs utilisateurs devront également évaluer les risques liés à l'introduction de nouvelles technologies dans les machines qu'ils acquerront.

Synthèse et conclusion

Jérôme Triolet (INRS) a repris les messages importants de chacune des présentations de cette journée. Le risque machines reste majeur et engendre des accidents graves et mortels mais également des maladies professionnelles. Il est fortement encadré par la réglementation. Les mesures de prévention doivent être intégrées dès la conception de la machine mais les utilisateurs doivent également prendre en compte ces risques avec l'aide des Carsat, des services de prévention et de santé au travail, et en associant les institutions représentatives du personnel. Pour cela, l'INRS et le réseau de l'Assurance maladie – Risques professionnels proposent une démarche structurée à travers des outils pratiques [8]. Enfin, il a été rappelé que cette journée s'inscrivait dans le cadre d'une campagne de sensibilisation à ce risque : « Avec les machines, le risque est toujours là » et son site dédié www.securite-machine.fr, permettant d'accéder à de nombreuses ressources pédagogiques et pratiques pour faire progresser la prévention des risques professionnels. ●

1. Le Cofrac atteste de la compétence des organismes tierce partie.

2. Hormis des retours d'expérience, l'organisation de la maintenance, étudiée notamment par l'INRS, n'était pas détaillée dans le cadre de cette journée technique. Les lecteurs qui le souhaitent peuvent se reporter au dossier consacré à ce sujet : <https://www.inrs.fr/risques/maintenance/facteurs-risque.html>

BIBLIOGRAPHIE

- [1] INRS – *Présentations et rediffusions de la journée technique Machines : agir tout au long du cycle de vie*. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/footer/actes-evenements/journee-technique-machines.html>
- [2] INRS – *Réussir l'acquisition d'une machine ou d'un équipement de travail*. Brochure ED 6231, 2016. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%206231>
- [3] INRS – *Constituer des fiches de poste*. Fiche pratique de sécurité ED 126, 2018. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%20126>
- [4] INRS – *Consignations et déconsignations*. Brochure ED 6109, 2020. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%206109>
- [5] NORME NF EN 17007 – *Processus maintenance et indicateurs associés*. Afnor, 2017. Accessible sur : <https://www.boutique.afnor.org/> (site payant).
- [6] NORME NF EN 17975 – *Maintenance – Processus de maîtrise des risques liés aux énergies et fluides lors d'opérations de maintenance – Recommandations*. Afnor, 2025. Accessible sur : <https://www.boutique.afnor.org/> (site payant).
- [7] INRS – *Amélioration des machines en service*. Guide pratique ED 6289, 2017. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%206289>
- [8] INRS – *Risque machines. S'informer pour prévenir*. Catalogue des productions ED 4707, 2025. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%204707>

Participez à la recherche



Bruit

→ Étude sur l'exposition au bruit en très hautes fréquences et aux ultrasons basses fréquences

Votre entreprise utilise des appareils générant des sons de très hautes fréquences audibles (THF : de 10 à 20 kHz) ou des ultrasons basses fréquences (USBF : de 20 à 30 kHz) : découpeuses (surgelés, charcuterie, confiseries, marqueterie, etc.), soudeuses métalliques ou thermoplastiques, bains nettoyeurs, ou tout autre appareil ou machine générant des fréquences supérieures à 10 kHz.

L'INRS a besoin de vous

pour évaluer l'exposition aux bruits THF et USBF des salariés travaillant à proximité des appareils générant des fréquences supérieures à 10 kHz. L'objectif est de collecter des données de terrain visant à mieux caractériser les situations d'exposition aux THF/USBF et à développer un protocole d'évaluation des risques correspondants. Cette évaluation comprendra des mesures d'exposition au bruit, des évaluations de l'audition des salariés, ainsi que des réponses à des questionnaires.

> Comment se déroulera l'étude ?

Les personnes en charge de l'étude rencontreront les entreprises souhaitant participer, pour leur présenter précisément le protocole d'intervention. Avec l'accord de l'entreprise et des salariés volontaires, l'étude se déroulera en deux temps :

- en amont des mesures, les participants devront répondre à des questionnaires en lien avec leur audition et leur sensibilité au bruit ;
- les personnes seront équipées de façon non contraignante d'un système de mesure de l'environnement sonore. Avant et après le poste de travail, il sera demandé aux participants de passer des tests audiométriques et de répondre à de courts questionnaires. Durant le poste, des mesures complémentaires seront effectuées par l'INRS pour qualifier au mieux l'émission sonore des machines et pouvoir, le cas échéant, proposer des solutions d'amélioration. Enfin, si l'activité le permet, le salarié pourra répondre à un questionnaire très court (1 minute) pendant son poste, pour qualifier son ressenti durant l'exposition.

L'intervention sera réalisée de façon à ne pas perturber l'activité. Les données recueillies, dont le seul but est de faire progresser les connaissances sur les THF/USBF,

seront anonymisées avant traitement. Les résultats des mesures, leur analyse ainsi que de possibles conseils, pourront être communiqués à l'entreprise *via* un rapport de synthèse et/ou une réunion de restitution.



Vous souhaitez participer ?

Contactez Jonathan Terroir
03 83 50 20 00 • etudeTHF@inrs.fr
INRS, département Ingénierie des équipements de travail
1, rue du Morvan, CS 60027,
54519 Vandœuvre-lès-Nancy Cedex



Scannez
ce QR-code
pour plus
d'informations

AGENDA/ ÉVÉNEMENTS



DU 5 AU 7 MAI 2026, NANCY

Congrès international – Prévention durable des TMS : nouveaux défis pour la recherche et la pratique

Les troubles musculosquelettiques (TMS) d'origine professionnelle constituent l'une des premières causes de maladies professionnelles et d'accidents du travail dans la plupart des pays, ainsi qu'un facteur de désinsertion professionnelle. Les évolutions telles que le télétravail, la sédentarité, la plateformesation, les nouvelles technologies, les nouvelles formes d'emploi, de travail et d'organisation, l'évolution des interactions au sein des collectifs, la diversité des populations au travail et les nouvelles aspirations des travailleurs ne cessent de reconfigurer la dynamique d'apparition des TMS. L'objectif de ce congrès est de mettre en évidence la richesse et la diversité des connaissances et des approches pluridisciplinaires relatives à la prévention des TMS. Il est ouvert à tous les professionnels impliqués dans la prévention des TMS, chercheurs, experts, praticiens et acteurs en entreprise. Les communications émaneront de disciplines variées : ergonomie, épidémiologie, médecine du travail, physiologie, psychologie, biomécanique, etc.

Renseignements – inscriptions :

[+ https://tms2026.inrs.fr](https://tms2026.inrs.fr)



27 ET 28 MAI 2026, HELSINKI (FINLANDE)

9^e Conférence Euroshnet

Le monde du travail se transforme à un rythme sans précédent. Le changement climatique pose d'importants défis pour la sécurité au travail, tandis que la transformation numérique crée de nouvelles opportunités pour des solutions innovantes. Ces évolutions exigent de repenser l'approche de la santé et de la sécurité au travail. Lors de cette conférence, des experts se réuniront pour explorer comment la normalisation, les essais et la certification peuvent évoluer afin de répondre à ces nouvelles réalités. La transformation numérique sera au cœur des débats, avec des discussions sur les applications de l'intelligence artificielle en matière de sécurité au travail, les EPI intelligents et l'utilisation sécurisée des véhicules autonomes. La manifestation sera également l'occasion d'aborder les normes de demain, les approches de test et de certification de nouvelle génération, les cadres réglementaires pour les technologies émergentes, ainsi que les meilleures pratiques à travers l'Europe.

Renseignements – inscriptions :

[+ https://www.euroshnet.eu/conference-2026](https://www.euroshnet.eu/conference-2026)



26 MAI 2026 (EN LIGNE)

Webinaire INRS – Batteries lithium : des dangers silencieux, des risques réels et des moyens pour les prévenir

L'INRS organise un webinaire sur la prévention des risques liés aux batteries lithium-ion, de plus en plus présentes dans le monde du travail, notamment pour alimenter des équipements électroniques, électroportatifs, de manutention et de mobilité. Ces batteries présentent des risques spécifiques qui sont encore peu connus, compris et pris en compte. Ce webinaire propose une synthèse des technologies concernées et des principaux risques associés, avec un focus sur les risques chimiques et d'incendie/explosion.

Renseignements – inscriptions :

<https://live.monstudiotv.com/event/webinaire-inrs-20260624-2677-4846-8ed1-aff49f0426f9/>



DU 2 AU 5 JUIN 2026, LYON

38^e Congrès national de médecine et santé au travail

Le Congrès national de médecine et santé au travail, qui se tient tous les deux ans, constitue un rendez-vous essentiel pour les acteurs de la santé au travail francophone, leur permettant de se tenir informés des dernières avancées du domaine tout en échangeant expériences et bonnes pratiques. Le programme est structuré autour de neuf thématiques clés, couvrant un large éventail des enjeux actuels de la santé et de la prévention au travail.

Renseignements – inscriptions :

<https://www.medecine-sante-travail.com/>

DU 16 AU 18 JUIN 2026, RENNES

Salon Préventica

Chaque édition de Préventica est l'occasion de proposer un congrès de plus de 150 conférences et ateliers, animés par des experts de renom, au service de l'amélioration de la qualité de vie et des conditions de travail.

Renseignements – inscriptions :

<https://www.preventica.com/salon/rennes-2026>



25 JUIN 2026 (EN LIGNE)

Webinaire INRS – Prévention du risque chimique : apport et utilisation de l'outil Seirich

L'INRS organise un webinaire sur la démarche de prévention du risque chimique et l'apport de l'outil Seirich dans cette démarche. Les produits chimiques, qu'ils soient manipulés ou émis, sont présents dans tous les secteurs d'activité. De nombreux salariés sont ainsi exposés à ces produits qui peuvent induire des effets néfastes sur la santé. Il est donc primordial en entreprise d'évaluer et de prévenir les risques chimiques afin de protéger la santé des salariés. Ce webinaire a pour objectif de présenter la démarche de prévention du risque chimique. Il abordera les différentes étapes qui seront illustrées à travers l'utilisation du logiciel Seirich : identification des dangers des produits utilisés ou émis, situations d'expositions, évaluation du risque résiduel et enfin élaboration du plan d'actions de prévention.

Renseignements – inscriptions :

<https://live.monstudiotv.com/event/webinaire-inrs-20260625-e4b4-4954-a719-9e64d897ffa6/>

POUR EN SAVOIR +

- Retrouvez l'ensemble des manifestations sur la santé et la sécurité au travail recensées par l'INRS sur : www.inrs.fr/footer/agenda.html

Formation

VIBRATIONS AU TRAVAIL : SE FORMER POUR PRÉVENIR UN RISQUE PROFESSIONNEL AUX EFFETS IRRÉVERSIBLES

Présentes dans de nombreux secteurs d'activité, les vibrations mécaniques constituent un risque professionnel encore trop souvent sous-estimé. Emplois d'outils portatifs, conduite d'engins ou travail sur des équipements vibrants peuvent pourtant entraîner des atteintes durables de la santé des salariés. Pour accompagner les entreprises et les acteurs de la prévention, l'INRS propose une formation dédiée, centrée sur la compréhension du risque associé aux vibrations, l'évaluation de l'exposition et la mise en œuvre de mesures de prévention adaptées aux réalités du terrain.

VIBRATIONS AT WORK: USE TRAINING TO PREVENT AN OCCUPATIONAL RISK WITH IRREVERSIBLE CONSEQUENCES – *Mechanical vibrations are present in numerous activity sectors, but are often underestimated as an occupational risk. Nevertheless, use of portable tools, heavy machinery or vibrating equipment can lead to long-term health effects for workers. To accompany companies and their partners in prevention, INRS offers specific training, centred on understanding vibration-associated risks, assessing exposure and implementing preventive measures adapted for each individual workplace.*

AURÉLIE
PÉRISSE
INRS,
département
Formation

Les vibrations mécaniques constituent l'un des risques professionnels les plus répandus, exposant un nombre conséquent de salariés, en particulier dans des secteurs tels que l'industrie, le bâtiment et les travaux publics (BTP), la logistique ou encore l'agriculture. Souvent banalisées car étroitement liées à l'utilisation d'outils ou d'engins indispensables à l'activité, elles peuvent pourtant avoir des conséquences importantes sur la santé des travailleurs lorsqu'elles ne sont pas maîtrisées. L'utilisation quotidienne de machines portatives – meuleuses, marteaux-piqueurs, perforateurs, ponceuses ou tronçonneuses – ou la conduite d'engins mobiles tels que chariots élévateurs, tracteurs, pelleteuses ou camions, exposent les salariés à un risque vibratoire certain. À court terme, ces expositions peuvent générer fatigue et inconfort. À plus long terme, elles sont susceptibles d'entraîner

des altérations graves et durables : atteintes du système main-bras, troubles lombalgiques chroniques, douleurs musculosquelettiques, perte de dextérité, troubles circulatoires ou neurologiques. Conscient de ces enjeux, l'INRS propose une formation afin d'accompagner les entreprises et les acteurs de la prévention dans la mise en œuvre d'une démarche structurée de prévention des risques liés aux vibrations.

Vibrations : un risque complexe et souvent banalisé

L'exposition aux vibrations mécaniques est classée en deux catégories, selon la zone du corps exposée :

- les vibrations transmises aux membres supérieurs (système « main-bras ») lors de l'utilisation d'outils portatifs ou guidés à la main. Elles concernent, par exemple, les opérateurs utilisant

des perceuses, des burineurs ou des ponceuses ;

- les vibrations affectant l'ensemble du corps, principalement rencontrées lors de la conduite d'engins ou de véhicules, notamment lorsque les sols sont irréguliers.

Le niveau de risque dépend de plusieurs facteurs qui se combinent : l'amplitude des vibrations émises par l'équipement, la durée quotidienne d'exposition, la répétitivité des tâches, mais aussi les postures de travail, les efforts physiques fournis, les conditions de travail (au froid, notamment) ainsi que le type et l'état du matériel utilisé. Les expositions peuvent être variables, intermittentes, ce qui contribue à rendre le risque plus difficilement évaluable.

Pourtant, les effets sur la santé sont aujourd'hui bien documentés. Les vibrations peuvent être à l'origine de troubles musculosquelettiques, de lombalgies, d'atteintes vasculaires des mains telles que le syndrome de Raynaud, de troubles neurologiques ou encore de pathologies dégénératives de la colonne vertébrale. Ces atteintes se développent souvent de manière progressive et insidieuse. Lorsqu'elles ne sont pas prises en charge à temps, elles peuvent devenir irréversibles et compromettre durablement la santé des salariés.

Une formation dédiée aux acteurs de la prévention

Face à ces risques, la formation « Accompagner les entreprises dans la démarche de prévention des risques liés aux vibrations » s'adresse aux professionnels impliqués dans la prévention des risques professionnels. Elle concerne en particulier :

- les préventeurs et responsables HSE en entreprise ;
- les intervenants en prévention des risques professionnels (IPRP) ;
- les acteurs des services de prévention et de santé au travail (SPST) ;
- les ingénieurs et techniciens participant à la conception ou à l'achat de matériel, ou à l'amélioration des situations de travail.

L'objectif est de leur fournir les connaissances et les outils nécessaires pour analyser les situations de travail, évaluer les expositions et proposer des actions de prévention adaptées aux réalités du terrain.

Comprendre les vibrations pour mieux les prévenir

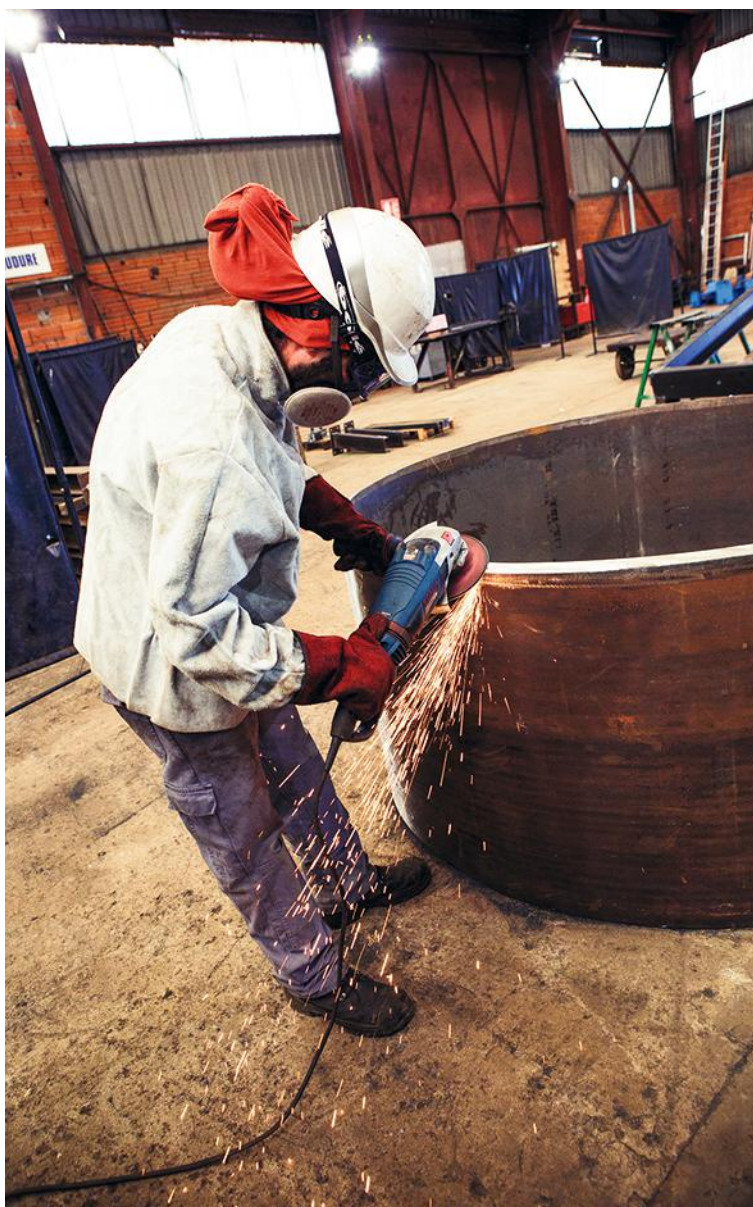
« L'objectif de cette formation est de permettre aux participants de conseiller efficacement les entreprises sur les mesures de prévention des risques liés aux vibrations », explique Anthony Benhora, chargé de projet formation à l'INRS.

Pour y parvenir, le stage apporte un socle de

connaissances techniques et réglementaires. Les participants sont d'abord sensibilisés aux notions fondamentales associées aux vibrations : grandeurs physiques, unités de mesure, types d'exposition et principes de propagation. Ces bases sont indispensables pour comprendre les résultats de mesurage et dialoguer avec les différents acteurs impliqués, qu'il s'agisse de fournisseurs de matériel, de services techniques ou de prestataires spécialisés.

La formation aborde également les principales situations de travail exposantes, qu'il s'agisse de l'utilisation de machines portatives, de la conduite d'engins mobiles ou du travail sur des équipements industriels. Les effets des vibrations sur la santé des travailleurs sont détaillés, afin de mieux appréhender les mécanismes physiopathologiques et les signaux d'alerte à prendre en compte.

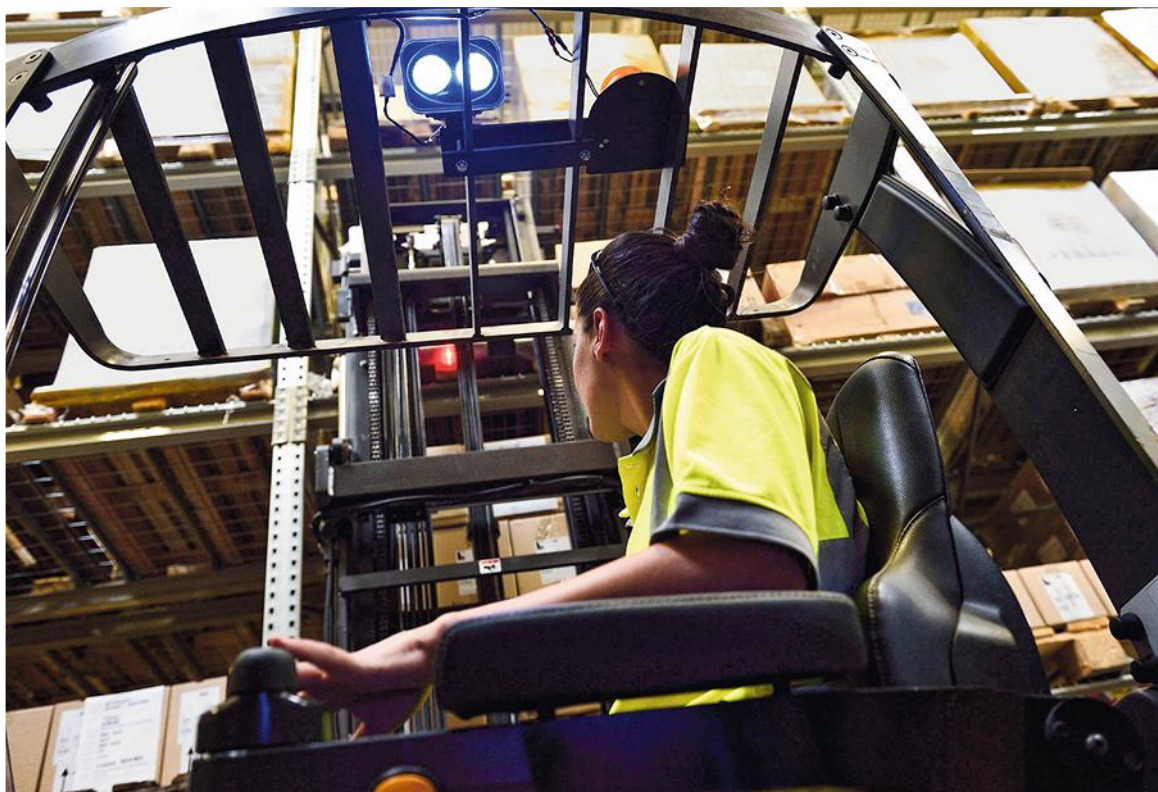
L'utilisation d'un outil portatif expose l'opérateur à des vibrations pouvant affecter les membres supérieurs.



© Vincent Nguyen pour l'INRS / 2016



La conduite d'un chariot électrique peut générer des vibrations transmises à l'ensemble du corps.



© Patrick Delapierre pour l'INRS/2017

Le cadre réglementaire applicable fait aussi partie intégrante du programme, notamment les valeurs limites d'exposition professionnelle et les valeurs d'action définies par la réglementation, ainsi que les obligations de l'employeur en matière d'évaluation et de prévention du risque.

Enfin, la formation développe la méthodologie d'évaluation et la démarche de prévention du risque vibratoire, ainsi que les préconisations spécifiques pour les postes de conduite d'engins mobiles et pour les vibrations transmises aux membres supérieurs (système mains-bras).

« Ces notions constituent un socle indispensable pour analyser les situations de travail et structurer une démarche de prévention adaptée. La formation repose sur une alternance d'exposés, d'études de cas, d'échanges de pratiques et de démonstrations, favorisant une appropriation progressive et directement transposable en entreprise », souligne Anthony Benhora.

Une approche concrète et opérationnelle, ancrée dans la réalité du terrain

Au-delà des apports théoriques, le stage met clairement l'accent sur la mise en œuvre d'actions de prévention concrètes. « L'objectif est d'aider les stagiaires à passer de l'analyse à l'action, en tenant compte des contraintes techniques, organisationnelles et économiques propres à chaque entreprise », précise Tom Curti, expert d'assistance-conseil à l'INRS.

Pour cela, la formation s'appuie sur des études de cas réalistes, construites à partir de situations proches de celles rencontrées en entreprise. « Nous travaillons sur des scénarios concrets, avec des personnages, des engins ou des outils représentatifs de situations de travail réelles », détaille l'expert.

À partir de ces cas pratiques, les participants apprennent à identifier et à évaluer les situations à risques, à analyser les possibilités de réduction des vibrations à la source – par exemple par le choix d'équipements moins vibrants – et à proposer des solutions techniques et organisationnelles adaptées. La réflexion porte également sur l'aménagement des postes de travail, l'organisation des tâches, la maintenance du matériel ou encore la formation et l'information des salariés.

Cette approche globale permet aux stagiaires de mieux accompagner les entreprises dans le choix, la mise en œuvre et le suivi des mesures de prévention, en intégrant la prévention des risques dus aux vibrations dans une démarche plus large d'amélioration des conditions de travail. ●

POUR EN SAVOIR +

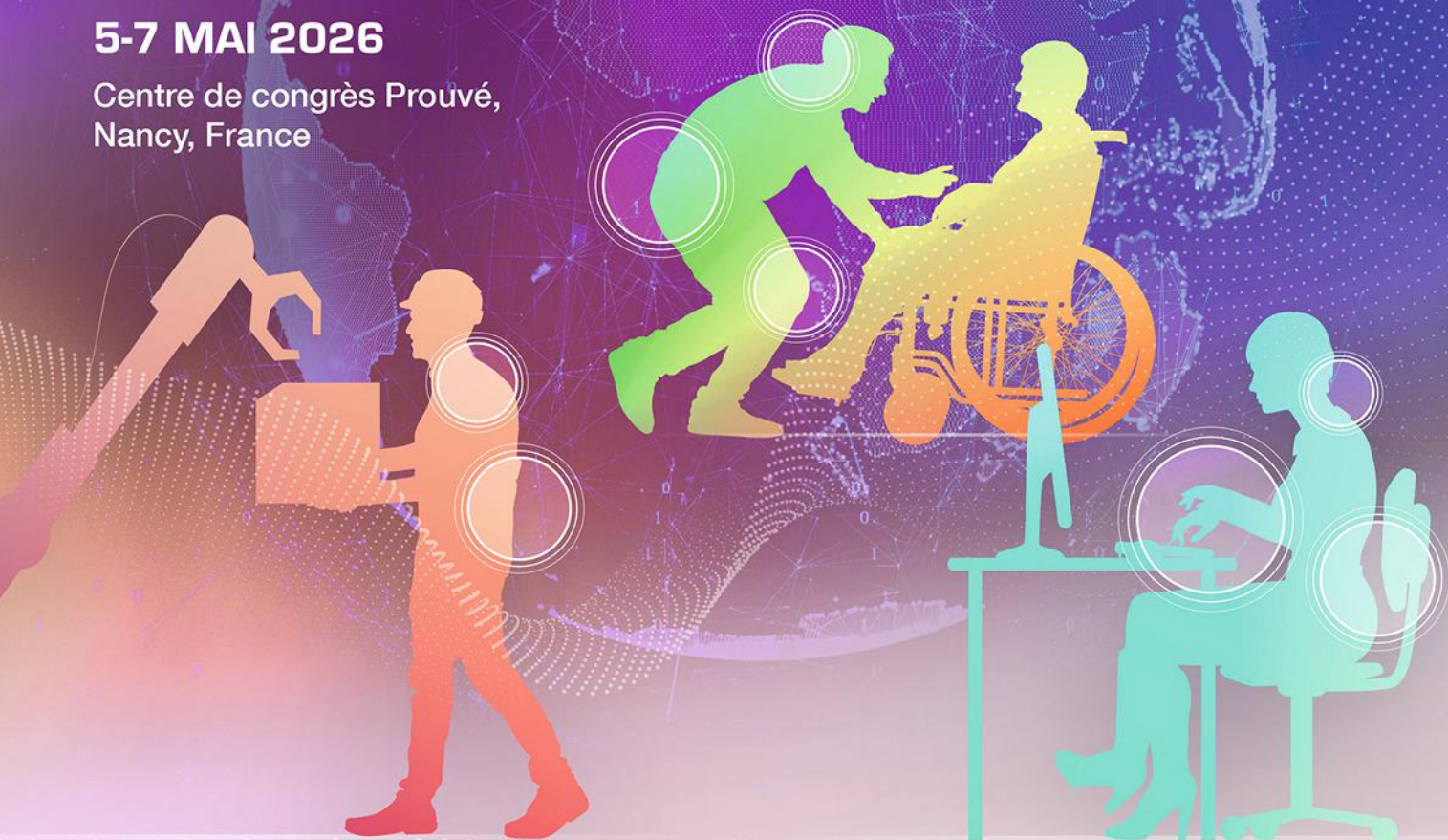
- Pour tout renseignement sur la formation, consulter le site internet de l'INRS : www.inrs.fr et renseigner le code JA0502.

Le programme complet et les modalités d'inscription sont détaillés sur la page du stage.

PRÉVENTION DURABLE DES TMS : NOUVEAUX DÉFIS POUR LA RECHERCHE ET LA PRATIQUE

5-7 MAI 2026

Centre de congrès Prouvé,
Nancy, France



Les troubles musculosquelettiques (TMS) d'origine professionnelle sont un problème majeur de santé au travail. Depuis plusieurs décennies, ils constituent l'une des premières causes de maladies professionnelles et d'accidents du travail dans la plupart des pays, ainsi qu'un facteur de désinsertion professionnelle.

Le télétravail, la sédentarité, la plateformesation, les nouvelles technologies, les nouvelles formes d'emploi, de travail et d'organisation, l'évolution des interactions au sein des collectifs et les

nouvelles aspirations des travailleurs ne cessent de reconfigurer la dynamique d'apparition des TMS.

L'objectif de ce congrès est de mettre en évidence la richesse et la diversité des connaissances et des approches pluridisciplinaires relatives à la prévention des TMS.

Ce congrès est ouvert à tous les professionnels impliqués dans la prévention des TMS, à savoir les chercheurs et acteurs de terrain, les législateurs et normalisateurs, et enfin les décideurs.

Information & inscription : tms2026.inrs.fr
Contact : tms2026.org@inrs.fr

AGENDA / FORMATIONS

Identifier les étapes clés d'une démarche de prévention des risques liés aux machines (JJ1606)

Deux sessions : du 27/05 au 29/05/2026 ou du 16/11 au 18/11/2026 à l'INRS (Paris).

→ PUBLIC

Fonctionnels « sécurité et santé au travail » en entreprise, intervenants en prévention des risques professionnels, acteurs des services de prévention et de santé au travail (médecins, infirmiers et intervenants en prévention des risques professionnels).

→ OBJECTIF

Contribuer à la mise en œuvre d'une démarche de prévention des risques liés aux machines.

Objectifs pédagogiques :

- Identifier les différentes étapes du cycle de vie d'une machine.
- Décrire l'approche réglementaire applicable aux machines.
- Identifier les étapes clés de la démarche de prévention des risques liés aux machines.

→ CONTENU

- Définitions.
- Le cycle de vie d'une machine.
- Contexte réglementaire.
- Démarche de prévention.

→ INFORMATIONS PRATIQUES

Durée : 2 jours

Responsable pédagogique : Danièle BLASIARD

Coût : 663 € nets (exonération de TVA).

Accompagner les entreprises dans la démarche de prévention des risques liés aux vibrations (JA0502)

Une session : du 08/06 au 12/06/2026 à l'INRS (Vandœuvre-lès-Nancy).

→ PUBLIC

Fonctionnels « sécurité et santé au travail », techniciens de bureaux d'études et méthodes, ingénieurs-conseils et contrôleurs de sécurité des services prévention des Carsat/Cramif/CGSS et acteurs des services de prévention et de santé au travail (médecins du travail,

infirmiers, intervenants en prévention des risques professionnels).

→ OBJECTIF

Conseiller les entreprises sur les mesures de prévention des risques liées aux vibrations.

Objectifs pédagogiques :

- Appréhender les problématiques de vibrations et de contraintes (postures, efforts) rencontrées par les conducteurs d'engins mobiles et les opérateurs de machines portatives ou guidées manuellement.
- Évaluer les vibrations au poste de travail.
- Dresser un état des lieux des solutions techniques pour réduire les vibrations (sièges, machines portatives antivibratiles, « gants »...).

→ CONTENU

- Notions de physique : grandeurs et unités.
- Source du risque en milieu professionnel : situations et postes de travail, engins et machines.
- Effets sur la santé : physiopathologie de la colonne lombaire et du membre supérieur (lombalgie, syndrome de Raynaud).
- Contexte réglementaire.
- Démarche de prévention : méthodologie d'évaluation du risque.
- Préconisations en prévention des vibrations aux postes de conduite des engins mobiles.
- Préconisations en prévention des vibrations transmises au système main-bras.

→ INFORMATIONS PRATIQUES

Durée : 4 jours

Responsable pédagogique : Anthony BENHORA

Coût : 1 325 € nets (exonération de TVA).

Prévenir les risques liés à l'exposition au radon (JA1510)

Une session : du 23/06 au 25/06/2026 à Limoges.

→ PUBLIC

Préventeurs d'entreprise concernés par le radon, référents radon des services prévention, agents des services prévention des Carsat/Cramif/CGSS, salariés désignés compétents sur le radon, préventeurs des services de prévention et de santé au travail (intervenants en prévention

des risques professionnels), préventeurs institutionnels (Dreets, MSA...).

→ OBJECTIF

Prévenir les risques professionnels liés à l'exposition au radon.

Objectifs pédagogiques :

- Décrire les effets sur la santé de l'exposition au radon.
- Identifier la réglementation applicable.
- Évaluer le risque et identifier les travailleurs à risque d'exposition.
- Présenter les outils et techniques de mesurage.
- Développer ou accompagner une démarche de prévention adaptée en entreprise.

→ CONTENU

- Bases en rayonnements ionisants (types d'émissions, unités de mesures spécifiques).
- Effets sur la santé.
- Réglementation.
- Évaluation du risque.
- Matériel et méthode de mesurage.
- Moyens de prévention.

→ INFORMATIONS PRATIQUES

Durée : 2 jours

Responsable pédagogique : Diane MAGOT

Coût : 663 € nets (exonération de TVA).

Évaluer et prévenir les risques biologiques en entreprise (JJ1430)

Une session : du 03/08 au 31/08/2026

et du 21/09 au 24/09/2026 en mixte distanciel et présentiel à l'INRS (Paris).

→ PUBLIC

Préventeurs d'entreprise et acteurs des services de prévention et de santé au travail (médecins, infirmiers et intervenants en prévention des risques professionnels).

→ OBJECTIF

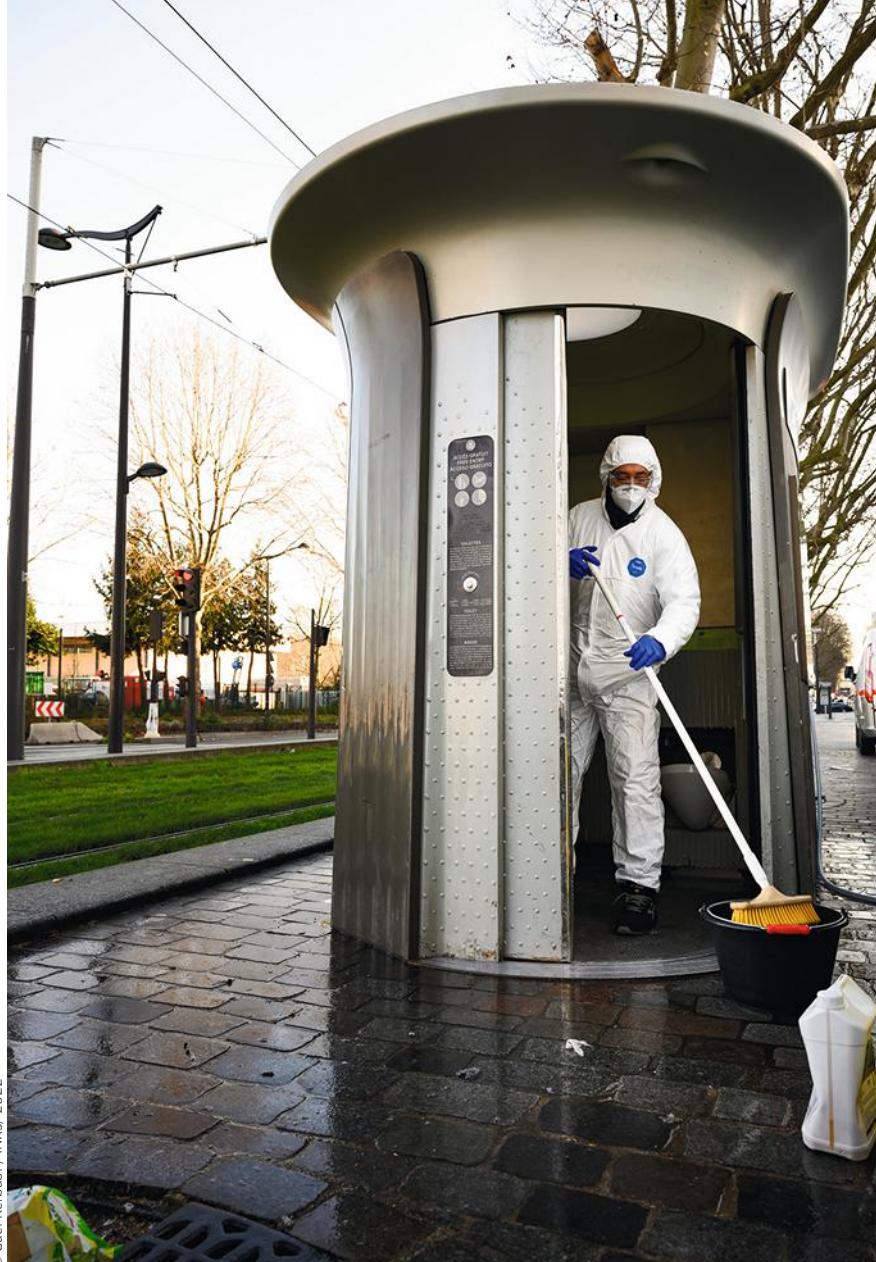
Évaluer et prévenir les risques biologiques en entreprise.

Objectifs pédagogiques :

- Identifier les sources de contamination possibles par des agents biologiques.
- Évaluer les risques d'exposition *via* la chaîne de transmission.
- Proposer des mesures de prévention adaptées.

→ CONTENU

- Agents biologiques et conditions de développement.
- Effets potentiels sur la santé et rôle des services de prévention et de santé au travail.



© Gaël Kerbaol / INRS / 2022

- Démarche d'évaluation : chaîne de transmission, métrologie.
- Mesures de prévention collectives et individuelles.
- *Note : La formation n'aborde pas les activités en milieu de soin.*

→ INFORMATIONS PRATIQUES

Durée : 3 jours

Responsable pédagogique : Aurore YANG

Coût : 994 € nets (exonération de TVA).

POUR EN SAVOIR +

Renseignements, inscriptions :

• INRS, département Formation
65, boulevard Richard-Lenoir, 75011 Paris
E-mail : secretariat.forp@inrs.fr

• Retrouvez toute l'offre de formation de l'INRS sur : www.inrs.fr/services/formation.html

Sélection bibliographique

À LIRE, À VOIR

Les publications de l'INRS sont consultables et téléchargeables sur : www.inrs.fr/Rubriques « Publications et outils/Brochures et dépliant », « Affiches et autocollants » (papier/Web) ou « Vidéos ».



Conception des laboratoires de chimie

INRS, 2025, brochure ED 6551, coll. Démarches de prévention (accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%206551> ; nouveauté).

La grande diversité des tâches effectuées et des risques encourus dans un laboratoire, le changement fréquent des activités et des méthodes de travail, rendent l'application des règles de prévention des risques chimiques parfois plus difficiles que sur un site industriel classique.

Ce guide donne la démarche générale de conception d'un laboratoire de chimie et détaille les mesures à prendre en compte pour permettre aux personnes qui y travaillent d'effectuer leurs activités dans les meilleures conditions possibles en assurant leur santé et leur sécurité. Ces préconisations sont applicables aux laboratoires de recherche et développement et aux laboratoires de contrôle.



Conseils pour commander et décrypter des analyses d'amiante dans les matériaux et dans l'air

INRS, 2025, brochure ED 6554, coll. Démarches de prévention (accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%206554> ; nouveauté).

Cette brochure s'adresse aux donneurs d'ordres et aux entreprises de travaux commanditaires de mesurages d'amiante dans les matériaux ou dans l'air des lieux de travail.

Elle leur apporte des conseils pratiques pour rechercher des organismes accrédités pouvant réaliser ces mesurages en fonction de la portée de leur accréditation et du domaine d'activité des travaux. Elle leur donne également des repères pour décrypter les rapports associés.



Grille d'évaluation de la qualité acoustique des espaces ouverts

INRS, 2026, outil 156 (accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=outil156> ; nouveauté).

Élaboré par l'INRS, cet outil est destiné à faire une première évaluation simple de la qualité acoustique d'un bureau ouvert (ou d'une zone particulière de cet espace). Il a pour but de mettre en évidence les principaux points de faiblesse acoustique du local et de son aménagement. À destination des préventeurs en entreprise, il est essentiellement basé sur des observations. Pour chaque élément de l'aménagement de l'espace évalué (plafond, sol, géométrie, etc.), une note comprise entre 0 et 5 est établie, 0 indique une mauvaise qualité et 5 une bonne qualité. Lorsque tous les éléments ont été évalués, une note globale, également comprise entre 0 et 5, témoigne de la qualité acoustique globale de l'espace de travail.



Risques psychosociaux, bien-être et qualité de vie au travail

INRS, 2025, fiche ED 8002, coll. Décryptages de l'INRS

(accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%208002> ; mise à jour).

Les notions de risques psychosociaux, de bien-être au travail et de qualité de vie au travail recouvrent des réalités distinctes, bien que des liens existent. Ce décriptage vise à clarifier ces trois termes. Il précise leurs liens avec les obligations des entreprises en matière de santé au travail et de prévention, ainsi que leurs cadres juridiques et réglementaires respectifs. Le rôle des deux notions les plus récentes dans l'élargissement des questions de santé au travail vers des enjeux sociétaux et de performance globale des entreprises est également évoqué.



Santé et sécurité des intérimaires. Cadre réglementaire

INRS, 2025, brochure, TJ 21, coll. Aide-mémoire juridique

(accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=TJ%2021> ; mise à jour).

L'intérim est une forme d'emploi particulière caractérisée par l'existence d'une relation tripartite liant un salarié, une entreprise de travail temporaire (ou agence d'emploi) qui l'emploie et une entreprise utilisatrice dans laquelle la mission est effectuée. Cet aide-mémoire juridique présente le rôle de chacune des entreprises dans la mise en oeuvre de la démarche de prévention des risques auxquels sont exposés les salariés intérimaires.



Mycotoxines en milieu de travail

INRS, 2025, fiche ED 4411 (accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%204411> ; mise à jour).

Cette fiche fait le point des connaissances sur les effets sur la santé des mycotoxines et les mesures de prévention possibles pour limiter l'exposition des travailleurs susceptibles d'être exposés.



Postes d'utilisation manuelle de solvants

INRS, 2025, brochure ED 6049, coll. Guides pratiques de ventilation

(accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%206049> ; mise à jour).

Ce document apporte des réponses pratiques à toute personne confrontée à la conception et à la réalisation d'une installation de ventilation sur un poste d'utilisation manuelle de solvants organiques. L'objectif à atteindre est le maintien de la salubrité de l'air aux postes de travail et dans les ateliers, par suppression ou diminution des émissions : substitution des produits, modification du procédé, captage des polluants au plus près de leur source d'émission... en vue d'obtenir les concentrations les plus faibles possibles. Les solutions de ventilation proposées constituent des moyens minimaux permettant de réaliser cet objectif dans la majorité des cas, sous réserve que l'ensemble des sources de pollution soit traité.



Le transport des matières dangereuses. L'ADR en question

INRS, 2025, Brochure ED 6134 (accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%206134> ; mise à jour).

L'ADR est l'accord européen relatif au transport international des marchandises dangereuses par route. Il est applicable aux transports effectués sur le territoire national et en partance pour l'Europe. Cette réglementation spécifique au transport/chargement/déchargement des marchandises dangereuses est complexe. Elle constitue néanmoins un réel atout pour aider les entreprises à mieux prévenir les risques professionnels des activités liées au transport de marchandises dangereuses. Cette brochure présente les obligations générales fixées par l'ADR pour transporter des marchandises dangereuses et explique en quoi leur respect participe à la prévention des risques professionnels. Tous les intervenants de la chaîne de transport sont concernés par l'ADR et ont des missions clairement définies à respecter.



Veille & prospective

Prospective

Défis écologiques, numériques
et recomposition des modes de production

P.113

Prospective

DÉFIS ÉCOLOGIQUES, NUMÉRIQUES ET RECOMPOSITION DES MODES DE PRODUCTION

Dans un contexte d'urgence écologique et de transformation numérique accélérée, la 38^e session nationale de l'Institut national du travail, de l'emploi et de la formation professionnelle (INTEFP) interroge les trajectoires possibles des entreprises : adaptation, anticipation ou réinvention. Visites, débats et retours d'expérience mettent en lumière les impacts sur les organisations, les métiers et la prévention des risques, et soulignent un levier central : un dialogue social renforcé pour construire des transitions justes et soutenables.

ECOLOGICAL AND DIGITAL CHALLENGES, AND THE OVERHAUL OF PRODUCTION MODES – In the context of the environmental emergency and of accelerating digital transformation, the 38th session of INTEFP (French national institute for labour, employment and professional training) examined potential futures for companies: adaptation, anticipation or reinvention. Visits, debates and returns on experience shed light on how the current context is impacting organisations, careers and risk prevention. The presentations highlighted a focal point: the need for stronger social dialogue to build fair and sustainable transitions.

JENNIFER
CLERTÉ
INRS, mission
Veille et
prospective

MÉLANIE
BURLET
directrice
de l'Innovation
et des
partenariats
de l'INTEFP

Compte rendu de la conférence

La restitution des travaux de la 38^e session nationale de l'INTEFP s'est tenue le 27 novembre 2025, à la Banque française mutualiste. Ces sessions, instaurées en 1986, ont pour but d'explorer de façon tripartite (administration publique, employeurs et organisations syndicales) les enjeux majeurs du monde du travail, en associant au sein d'un groupe d'auditeurs des représentants des entreprises et des salariés, ainsi que des cadres supérieurs de la fonction publique, des parlementaires ou des journalistes.

Cette 38^e session s'est inscrite dans un contexte où la transition écologique ne constitue plus seulement un horizon souhaitable : elle est désormais un impératif. C'est ce qu'a rappelé Mélanie Burlet, en introduction de ces ateliers. Selon le consensus scientifique, sept des neuf limites planétaires¹ sont aujourd'hui largement franchies. Parallèlement, la transformation numérique continue de reconfigurer les processus productifs, les modes de consommation et l'organisation du travail. Face à cette double dynamique, les entreprises, les salariés et les acteurs du dialogue social sont confrontés à une question décisive : comment construire des trajectoires soutenables, justes et désirables pour toutes et tous ? C'est cette problématique que les auditeurs de la

session ont placée au cœur de leurs travaux. Un fil directeur a rapidement émergé : la transition écologique structure désormais toutes les autres transformations, car les objectifs politiques – réduction de 55 % des émissions de gaz à effet de serre d'ici 2030, neutralité carbone à l'horizon 2050 – imposent une accélération des transformations industrielles. Elle nécessite donc l'amorce de bifurcations profondes, susceptibles de transformer durablement les modes de production. La transformation est appelée à être davantage considérée comme un outil au service de la transition écologique *via* les solutions de rénovation ou d'économie d'énergie qu'elle peut apporter, tout en considérant son coût environnemental. Pour conduire ces réflexions menées de juin 2024 à novembre 2025, les travaux de ce groupe se sont organisés autour de cinq modules. Le premier module a consisté en une analyse rétrospective et prospective des enjeux afin de permettre au groupe de s'approprier le sujet. Une exploration du secteur industriel outre-Rhin a ensuite permis d'observer comment ces enjeux se matérialisent en entreprise et donnent lieu à différents modèles d'adaptation à ces grandes mutations. Une troisième étape a consisté à analyser le rôle joué par les acteurs locaux et les dynamiques territoriales dans les évolutions des systèmes productifs. Le quatrième module a abouti



à une synthèse des constats à l'échelle européenne et internationale, ainsi que des opportunités et des risques que ces enjeux induisent pour l'avenir en matière de production, d'emploi et de travail. Le cinquième et dernier module a été consacré à la capitalisation des travaux et à la préparation des ateliers de l'INTEFP, qui ont eu lieu le 27 novembre 2025. Ils ont été organisés autour de trois séquences présentant les grands enseignements de ce travail.

Séquence n° 1 : les transformations actuelles dans les entreprises répondent-elles aux enjeux ?

Depuis leur mise en place en 1986, les sessions de l'INTEFP s'appuient sur des visites d'entreprises et des rencontres de partenaires sociaux à l'international pour conduire leur réflexion. Ces voyages pédagogiques permettent aux auditeurs d'enrichir leur analyse de pratiques conduites au-delà de nos frontières. Pour cette nouvelle session, l'INTEFP a choisi l'Allemagne et son industrie automobile, incarnant à la fois l'intensité de la concurrence internationale, la complexité des chaînes de valeur et la nécessité d'engager une décarbonation rapide. Les visites réalisées chez Renault, Bosch, Opel-Stellantis et Dillinger ont permis aux auditeurs d'observer et d'écouter ces entreprises, toutes traversées par les mêmes enjeux : l'électrification, la sobriété énergétique, l'automatisation des processus, la relocalisation partielle et les restructurations industrielles. Cependant, chacune a donné à voir des stratégies différentes :

- Bosch, avec 4300 salariés, opère une transition des moteurs diesel vers les composants électriques, soutenue par une forte mobilisation des salariés au-delà du cadre de la gestion.
- Opel-Stellantis, ancien géant de plus de 15000 salariés au début des années 2000, a drastiquement réduit ses effectifs avec le passage à l'électrique tout en maintenant une politique de « zéro licenciement » *via* des départs volontaires, sans modifier fondamentalement son modèle de production en série.
- Dillinger, spécialiste de l'acier, mise sur l'« acier vert » *via* l'hydrogène et le recyclage, avec un objectif de réduction de 55 % de ses émissions de GES d'ici 2030 et la neutralité carbone en 2045. Ce virage implique cependant la reconversion de 2000 salariés et la suppression de 400 postes sur 3585, et dépend en grande partie de financements publics et privés.
- En parallèle de ces exemples d'entreprises allemandes, le groupe de travail a souhaité s'arrêter aussi sur l'exemple du site Renault de Flins en France, rebaptisé « Refactory ». Avec 1800 salariés, le site incarne pour sa part une transformation plus radicale : il abandonne l'assemblage automobile pour devenir un site dédié à l'économie cir-

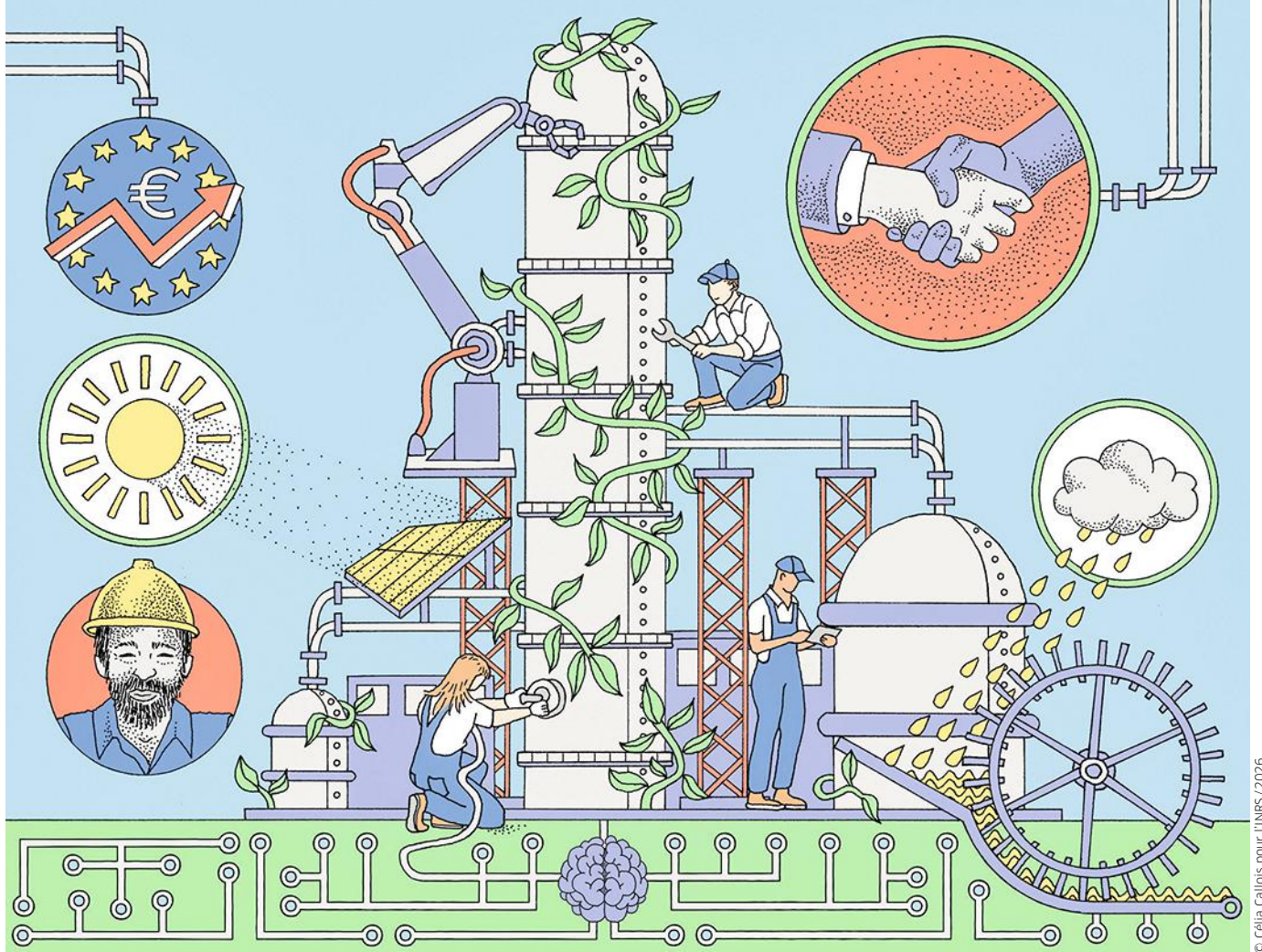
culaire, avec un dialogue social renouvelé pour l'occasion, plus en amont et itératif, et un modèle économique réinventé autour de la réparation, du réemploi et du recyclage.

Trois types de trajectoire se distinguent alors : les « suiveurs », qui s'adaptent aux réglementations ou à la concurrence ; les « anticipateurs », qui choisissent proactivement la transition, souvent avec un soutien public ; et les « réinventeurs », qui transforment profondément leur modèle économique et leurs modes de production, comme Refactory. Malgré ces différences, un point récurrent est apparu : la transition écologique et la transformation numérique doivent être pensées de façon articulée. Les outils digitaux – jumeaux numériques, intelligence artificielle, maintenance prédictive, automatisation flexible – sont devenus indispensables pour améliorer la performance énergétique, repenser la conception des produits et optimiser les flux dans un contexte concurrentiel. Mais ces innovations ne sont pas neutres du point de vue de l'environnement et du travail. Les deux dynamiques de changement modifient les métiers, déplacent les compétences, redéfinissent les marges d'autonomie et les responsabilités, et influent par là même sur les conditions de travail et la santé et la sécurité au travail.

Les auditeurs ont aussi pu observer que les trajectoires diffèrent selon la culture de dialogue social. En Allemagne, la codétermination (motivée par une forte aspiration à la paix sociale et à la stabilité) offre aux représentants des salariés un rôle dans les décisions stratégiques. En France, le dialogue social accompagne la transition mais reste souvent en aval des choix structurants. Ce contraste entre les deux pays invite à repenser la place des représentants des salariés français dans les dynamiques de transformation, pour qu'ils puissent contribuer aux orientations plutôt qu'en gérer seulement les conséquences. Cette approche du dialogue social permettrait notamment le développement d'une démarche « *safety in design*² ».

Séquence n° 2 : les gouvernances aux prises avec des enjeux complexes et conflictuels

Les auditeurs se sont ensuite penchés sur les obstacles rencontrés par les gouvernances en charge de décider collectivement d'une orientation autour des sujets de transition. Pour restituer de la façon la plus vivante possible les observations et réflexions du troisième module, la séquence a été organisée sous la forme d'un journal télévisé. Il s'est agi dans un premier temps de présenter l'émergence de nouvelles formes de gouvernance, comme l'assemblée populaire du Rhône, représentant les droits du fleuve ou de la conférence des parties (COP) territoriale Auvergne-Rhône-Alpes. Dans un second temps, les organisateurs ont imaginé un atelier mettant en scène les frictions du dialogue entre représentants



© Célia Callois pour l'INRS / 2026

d'intérêts divergents. Le débat mis en scène et joué par les auditeurs autour du thème « *Faut-il sauver l'industrie ou le monde ?* » confrontait les points de vue du porte-parole de l'organisation patronale fictive « Industrie pour l'Europe » et de la porte-parole du réseau appelé pour l'occasion « Action transition », une coalition d'ONG engagée dans la lutte pour une transition écologique ambitieuse. Le jeu d'acteurs des intervenants a permis de donner à voir la densité des controverses articulées autour des questions de concurrence internationale, des besoins économiques et industriels, des usages des ressources, de la consommation domestique, de la protection des milieux naturels et des conditions de travail des salariés, avec une tension majeure autour de la place de la réglementation. Il en ressort que le dialogue social, bien que décisif pour préserver les conditions de travail dans un contexte de transition, rencontre beaucoup de difficultés pour aboutir à des compromis acceptables pour tous.

Séquence n° 3 : vers un dialogue social revitalisé pour accompagner les enjeux de la transition

La dernière séquence s'est concentrée sur le rôle que devrait jouer le dialogue social dans ces transitions à l'avenir. En effet, celui-ci a un rôle décisif, car toute transition a un impact sur l'emploi, le travail, la santé et la sécurité, ou les conditions de travail. Il revient donc aux différents partenaires de se saisir de ces sujets pour ne pas les subir. Or l'OIT³ a constaté que

le dialogue social s'empare encore trop peu souvent de la question de la transition écologique, notamment. Cette séquence a été animée sous la forme de trois tables rondes, chacune consacrée à un axe spécifique : points de blocage et tensions soulevées par les transitions, leviers, conclusions. Parmi les blocages relevés, quatre points principaux ont été retenus :

- les évolutions constantes du cadre législatif et réglementaire (loi El Khomri, ordonnances Macron, loi Climat et résilience...) constituent un contexte mouvant dans lequel les instances du personnel ont non seulement vu leur fonctionnement fortement changer mais ont aussi dû faire face à des sujets de plus en plus nombreux ;
 - une cartographie d'acteurs (entreprises, territoires, branches et organisations) difficile à articuler ;
 - le caractère complexe et inédit de ces transitions, conjugué à leur forte technicité, conduit à ce qu'elles ne soient pas encore perçues comme des priorités par les organisations ;
 - enfin, le travail reste souvent un angle mort des débats sur les transitions parce qu'il est difficile d'anticiper les conditions concrètes de réalisation et d'organisation du travail qui doivent accompagner les transitions écologiques et numériques.
- Certains facteurs de blocage sont spécifiques à certains acteurs :
- pour les élus, le groupe de travail souligne le manque de moyens, la peur de la discrimination et le manque de formation ;



- pour les employeurs, les budgets serrés incitent à privilégier une adaptation minimale plutôt qu'une véritable transformation;
- pour les pouvoirs publics, la fluctuation des orientations et les financements instables empêchent une action sur le long terme;
- pour les salariés, la difficulté à relier leur démarche personnelle de citoyen à celle de l'entreprise est pointée.

Concernant les leviers à mettre en œuvre, le groupe considère d'abord la notion de soutenabilité comme la pierre angulaire de transitions justes. Il s'agira à la fois de réfléchir à la façon de bâtir des trajectoires plus sobres, tout en garantissant un travail soutenable, dans le cadre de processus démocratiques.

Deux leviers concrets sont envisagés ici :

- formation et acculturation : les élus devraient recevoir une formation obligatoire en début de mandat sur la transition écologique, l'intelligence artificielle (IA) et le reporting environnemental;
 - création de commissions dédiées: ces commissions permettraient d'identifier des élus référents dotés du temps nécessaire pour porter la voix de salariés et travailler avec les directions à des stratégies d'adaptation cohérentes et à leur suivi. Des exemples tels que celui de la Banque populaire du Sud laissent entrevoir les résultats possibles. Une commission IA permettrait quant à elle d'anticiper les impacts sur les métiers, la protection des données, les conséquences sur l'organisation du travail.
- Quelques autres leviers ont été évoqués sans être détaillés, comme la nécessité de clarifier les missions du CSE issues de la loi Climat et résilience ; accorder des moyens supplémentaires aux élus ; instaurer des consultations obligatoires sur les transitions ; faire évoluer les CSE vers des CSEE intégrant pleinement l'enjeu environnemental, ou encore élargir le droit à l'expertise sur ces sujets.

Conclusion

En conclusion, Sophie Thiery (présidente de la Commission travail-emploi au Cese) et Jérôme Marchand-Arvier (conseiller d'État, ancien délégué général à l'Emploi et à la Formation professionnelle) ont été invités à mettre ces travaux en perspective avec leur connaissance des enjeux.

Sophie Thiery a commencé par rappeler les trois « tsunamis » sur le point de bouleverser le monde du travail : le vieillissement de la population générale et active, la révolution technologique de l'IA, et le réchauffement climatique. Ces changements radicaux nécessitent une prise de conscience des conséquences que nos choix stratégiques auront sur nos organisations demain et qui peut émerger à la faveur d'un dialogue social soutenu. Elle souligne l'enjeu de la formation des instances à ces problématiques, comme véritable prérequis pour permettre aux acteurs de s'emparer de ces sujets.

À la question : faut-il changer de modèle pour faire face aux enjeux des transitions écologique et numérique ?, Jérôme Marchand-Arvier a proposé de se remémorer qu'« en tout temps, l'humanité avait trouvé le moyen de s'adapter et de réorienter sa trajectoire pour se préserver ». Aujourd'hui, les modèles de l'IA prônés par l'Union européenne diffèrent grandement de ceux de la Chine et des États-Unis. Sur le plan de la transition écologique, il observe que 160 entreprises ont traité de ce sujet dans leurs accords entre 2020 et 2024 – dont la moitié en 2024 – et il y voit l'amorce d'une action collective positive.

En définitive les deux intervenants s'entendent sur la nécessité de favoriser le dialogue social afin de permettre aux acteurs de s'aligner sur une stratégie qui soit souhaitable pour l'ensemble des parties prenantes.

Pour terminer, les différentes séquences ont souligné que les transitions écologique et numérique peuvent être à la fois considérées comme une contrainte, une opportunité et un champ de controverses. Elles obligent à redéfinir nos modèles productifs, à repenser la place du travail et à reconfigurer le dialogue social.

L'enjeu n'est plus seulement de réussir la transition, mais de choisir collectivement les trajectoires désirables : celles qui permettront d'allier développement économique, justice sociale et soutenabilité environnementale. Les auditeurs de l'INTEFP, en confrontant leurs analyses et leurs expériences, contribuent à éclairer ce chemin complexe, souvent conflictuel, mais essentiel pour préparer l'avenir.

En s'emparant de ces deux thèmes majeurs à la fois complémentaires et en opposition, la 38^e session de l'INTEFP a mis en lumière la complexité d'accompagner ces transitions dans les entreprises et l'importance du dialogue social pour les conduire de manière juste et soutenable. Les premiers résultats de cette session sont disponibles en ligne⁴. Un web-documentaire en restituant de façon plus approfondie les enseignements sera publié dans le courant du premier semestre 2026. ●

1. Les neuf limites planétaires : le changement climatique, la destruction de la biodiversité, l'utilisation massive d'engrais (l'azote et le phosphore), le changement d'usage des sols (la déforestation), le cycle de l'eau douce, le rejet de nouvelles substances dans la nature, l'acidification des océans, l'appauvrissement de la couche d'ozone, l'augmentation du nombre de particules dans l'atmosphère. En septembre 2025, seules les deux dernières limites n'ont pas été franchies. Source : <https://www.notre-environnement.gouv.fr/>

2. Intégration de la sécurité en amont de la conception et de la mise en production des équipements de travail, ainsi que tout au long du cycle de vie.

3. Organisation internationale du travail - Entretien de Mustapha Gay enregistré et retransmis lors de la conférence.

4. Voir : <https://www.intefp.travail-emploi.gouv.fr/fr/le-lab-de-lintefp/sessions-nationales/lagora-du-travail-le-magazine-des-sessions-nationales>



HYGIÈNE & SÉCURITÉ DU TRAVAIL (HST)

publication éditée par
l'INRS, Institut national de
recherche et de sécurité pour
la prévention des accidents
du travail et des maladies
professionnelles

65, boulevard Richard-Lenoir
75011 Paris – France
Tél.: 01 40 44 30 00
Dépôt légal :
1^{er} trimestre 2026
n° 2511.0384
ISSN 0007-9952
[www.inrs.fr/publications/
hst/dans-ce-numero.html](http://www.inrs.fr/publications/hst/dans-ce-numero.html)

INRS service abonnements

Service Diffusion,
reprographie
et logistique (DRL)
Hygiène & sécurité du travail
Rue du Morvan, CS 60027
54519 Vandœuvre-
lès-Nancy CEDEX
Tél.: 03 83 50 20 08 /
03 83 50 98 61
abo.revues@inrs.fr

Photogravure

Keygraphic

Impression

Corlet Imprimeur
14110 Condé-sur-Noireau
France

L'autorisation de reproduire
totalement ou partiellement
des articles parus dans
Hygiène et sécurité du travail
(HST) doit être sollicitée
à l'avance et par écrit.
Toute reproduction, quel
qu'en soit le support
(à l'exception des copies
à usage interne), qui n'aurait
pas été précédée d'un accord
préalable, serait effectuée
en violation des droits
de l'éditeur.



**Retrouvez
tous les articles sur
www.hst.fr**