



Les fumées de soudage et des techniques connexes

ED 6132

AIDE-MÉMOIRE TECHNIQUE

L'Institut national de recherche et de sécurité (INRS)

Dans le domaine de la prévention des risques professionnels, l'INRS est un organisme scientifique et technique qui travaille, au plan institutionnel, avec la CNAMTS, les CARSAT, CRAM, CGSS et plus ponctuellement pour les services de l'État ainsi que pour tout autre organisme s'occupant de prévention des risques professionnels.

Il développe un ensemble de savoir-faire pluridisciplinaires qu'il met à la disposition de tous ceux qui, en entreprise, sont chargés de la prévention : chef d'entreprise, médecin du travail, CHSCT, salariés.

Face à la complexité des problèmes, l'Institut dispose de compétences scientifiques, techniques et médicales couvrant une très grande variété de disciplines, toutes au service de la maîtrise des risques professionnels.

Ainsi, l'INRS élabore et diffuse des documents intéressants l'hygiène et la sécurité du travail : publications (périodiques ou non), affiches, audiovisuels, multimédias, site Internet... Les publications

de l'INRS sont distribuées par les CARSAT.

Pour les obtenir, adressez-vous au service Prévention de la caisse régionale ou de la caisse générale de votre circonscription, dont l'adresse est mentionnée en fin de brochure.

L'INRS est une association sans but lucratif (loi 1901) constituée sous l'égide de la CNAMTS et soumise au contrôle financier de l'État. Géré par un conseil d'administration constitué à parité d'un collègue représentant les employeurs et d'un collègue représentant les salariés, il est présidé alternativement par un représentant de chacun des deux collèges. Son financement est assuré en quasi-totalité par le Fonds national de prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles.

Les caisses d'assurance retraite et de la santé au travail (CARSAT), les caisses régionales d'assurance maladie (CRAM) et caisses générales de sécurité sociale (CGSS)

Les caisses d'assurance retraite et de la santé au travail, les caisses régionales d'assurance maladie et les caisses générales de sécurité sociale disposent, pour participer à la diminution des risques professionnels dans leur région, d'un service Prévention composé d'ingénieurs-conseils et de contrôleurs de sécurité. Spécifiquement formés aux disciplines de la prévention des risques professionnels et s'appuyant sur l'expérience quotidienne de l'entreprise, ils sont en mesure de conseiller et, sous certaines conditions, de soutenir les acteurs de l'entreprise (direction, médecin du travail, CHSCT, etc.) dans la mise en œuvre des démarches et outils de prévention les mieux adaptés à chaque situation. Ils assurent la mise à disposition de tous les documents édités par l'INRS.

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'INRS, de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause, est illicite.
Il en est de même pour la traduction, l'adaptation ou la transformation, l'arrangement ou la reproduction, par un art ou un procédé quelconque (article L. 122-4 du code de la propriété intellectuelle).
La violation des droits d'auteur constitue une contrefaçon punie d'un emprisonnement de trois ans et d'une amende de 300 000 euros (article L. 335-2 et suivants du code de la propriété intellectuelle).

Les fumées de soudage et des techniques connexes

Myriam Ricaud
Département Expertise
et conseil technique, INRS

SOMMAIRE

| | |
|---|----|
| 1 Composition, formation et émission des fumées | 4 |
| 1.1. La composition des fumées | 4 |
| 1.2. La formation des fumées | 4 |
| 1.3. L'émission des fumées | 6 |
| 2 Réglementation | 7 |
| 2.1. L'aération et l'assainissement | 7 |
| 2.2. Le risque chimique | 7 |
| 2.3. Les valeurs limites d'exposition professionnelle | 8 |
| 2.4. Les maladies professionnelles ou à caractère professionnel | 9 |
| 3 Effets des fumées sur la santé | 10 |
| 3.1. Les polluants gazeux | 10 |
| 3.2. Les polluants particulaires | 12 |
| 4 Polluants émis selon les procédés et les matériaux | 15 |
| 4.1. Le soudage | 15 |
| 4.2. Le coupage | 20 |
| 4.3. La projection thermique | 22 |
| 4.4. Le brasage | 23 |
| Annexe | 25 |
| Bibliographie | 25 |

Cette brochure est inspirée du document BGI 593 « Schadstoffe beim chweißen und bei verwandten Verfahren », avec l'aimable autorisation du Berufsgenossenschaft Metall Nord Süd, Vilia Elena SPIEGEL-CIOBANU.

Les activités de soudage, de coupage, de brasage et de projection thermique s'exercent dans de nombreux secteurs d'activité (métallurgie, nucléaire, agroalimentaire, électronique, automobile, aéronautique, etc.), que ce soit en production, en construction ou en maintenance, en atelier ou sur chantier.

Du fait des hautes températures atteintes au point de fusion, les différents procédés de soudage, de coupage ainsi que les techniques connexes émettent des fumées qui peuvent être inhalées par les opérateurs et les personnes travaillant à proximité. Ces fumées, composées d'un mélange de gaz et de poussières, peuvent, selon leur composition, leur concentration et la durée d'exposition, présenter des effets néfastes pour la santé et être à l'origine de pathologies professionnelles.

Dans les ambiances de travail, les concentrations de fumées peuvent ainsi être très élevées et atteindre plusieurs dizaines de mg/m^3 . En France, la valeur limite d'exposition professionnelle sur huit heures pour la totalité des poussières composant les fumées de soudage est de $5 \text{ mg}/\text{m}^3$. Il existe également des valeurs limites d'exposition professionnelle à de nombreux constituants des fumées tels que le chrome, l'ozone, le monoxyde de carbone ou le nickel.

Afin de protéger la santé des opérateurs et des personnes travaillant à proximité, des mesures de prévention visant à limiter les expositions aux fumées doivent être définies et mises en place. Il convient, dans un premier temps, de sélectionner de préférence les procédés et les matériaux de base et d'apport les moins émissifs et les moins polluants.

Cette brochure propose ainsi de faire un point sur la composition, la formation, l'émission et la toxicité de fumées émises lors de travaux de soudage et des techniques connexes en fonction des procédés mis en œuvre et des matériaux de base et d'apport utilisés. Un bref rappel de la réglementation est également présenté.

L'utilisation de procédés et de matériaux de base et d'apport les moins émissifs et les moins polluants s'avère parfois insuffisante pour garantir un air sain. Il est donc nécessaire, afin d'assurer la protection des travailleurs contre les risques d'inhalation de fumées, de capter ces dernières à leur source d'émission [1], de mettre en place en complément une ventilation générale [2] ou, à défaut, de porter un appareil de protection respiratoire [3].

1 Composition, formation et émission des fumées

1.1. La composition des fumées

Les différents procédés de soudage et les techniques connexes (coupage, brasage, projection thermique, etc.) génèrent des fumées qui peuvent être inhalées par l'opérateur et les personnes travaillant à proximité.

Ces fumées, mélangées à de l'air chaud, sont formées en proportions variables :

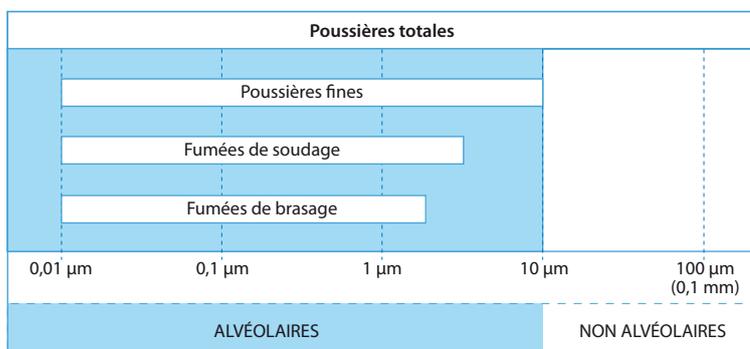
– de gaz : gaz protecteurs (argon, hélium, etc.), gaz émis par l'opération elle-même (monoxyde de carbone, ozone,

etc.) et gaz issus de la dégradation thermique ou photochimique de revêtements éventuellement présents sur les pièces (phosgène, formaldéhyde, etc.),

– de particules solides métalliques et d'oxydes métalliques (oxydes de zinc, de cadmium, de chrome, d'aluminium et de fer, etc.). Elles présentent un diamètre inférieur à $1\ \mu\text{m}$, voire même plus généralement inférieur à $0,1\ \mu\text{m}$, soit $100\ \text{nm}$ (voir figure 1). Ces particules, nommées généralement particules ultrafines, sont susceptibles d'atteindre le poumon profond, c'est-à-dire la région alvéolaire du système respiratoire (voir figure 2).

Les particules générées lors des activités de soudage et des techniques connexes présentent un diamètre et une morphologie qui varient selon le procédé mis en œuvre (voir figure 3). Par ailleurs, elles ont tendance à former spontanément et très rapidement des chaînes et des agglomérats (voir figure 4).

Figure 1. Le diamètre des particules émises lors du soudage et du brasage



1.2. La formation des fumées

Du fait des hautes températures atteintes au point de fusion, les différents procédés de soudage, de coupage, de brasage, etc. émettent des fumées sous l'effet des processus physiques et/ou chimiques suivants (voir figure 5) :

- vaporisation,
- condensation,
- oxydation,
- décomposition,
- pyrolyse,
- combustion.

Les fractions inhalable, thoracique et alvéolaire

Le système respiratoire peut se diviser en trois zones : les voies aériennes supérieures, l'arbre trachéobronchique et la région alvéolaire.

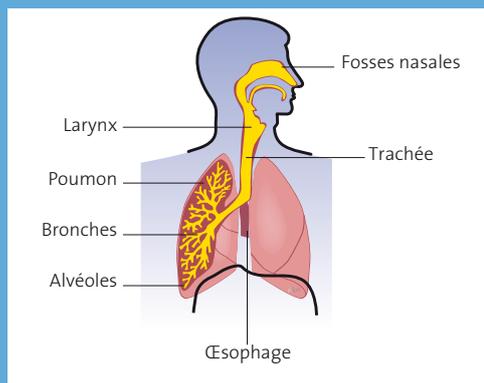


Figure 2. Les différentes régions du système respiratoire

Sur la base de ce découpage, trois fractions de particules ont été définies selon leur taille : les fractions inhalable, thoracique et alvéolaire (d'après la norme AFNOR EN 481). Elles donnent des indications sur la pénétration et le dépôt des particules dans le système respiratoire et sur leurs effets potentiels sur la santé.

• Fraction inhalable : fraction massique de particules en suspension dans l'air pouvant pénétrer dans l'organisme par la bouche et le nez et se déposer dans les voies respiratoires ; elle comprend des particules dont le diamètre aérodynamique¹ peut atteindre $100\ \mu\text{m}$.

• Fraction thoracique : fraction massique de particules qui, une fois inhalées, peuvent pénétrer au-delà du larynx ; elle comprend des particules dont le diamètre aérodynamique peut atteindre $30\ \mu\text{m}$.

• Fraction alvéolaire : fraction massique de particules qui, une fois inhalées, peuvent pénétrer jusqu'aux alvéoles pulmonaires ; elle comprend des particules dont le diamètre aérodynamique peut atteindre $10\ \mu\text{m}$.

Les particules émises lors des travaux de soudage et de coupage ayant un diamètre aérodynamique inférieur à $1\ \mu\text{m}$, la fraction alvéolaire joue un rôle central du point de vue des effets sur la santé. Les données relatives aux poussières inhalables conduisent plutôt à une surestimation qu'à une sous-estimation de l'exposition.

1. Le diamètre aérodynamique d'une particule est le diamètre d'une sphère de masse volumique $10^3\ \text{kgm}^{-3}$ dont la vitesse limite de chute en air calme est identique à celle de la particule dans les mêmes conditions de pression, température et humidité relative. Le diamètre aérodynamique intègre à la fois la taille de la particule (et donc ses dimensions géométriques), sa forme et sa densité.

Figure 3. Les dimensions et la morphologie des particules, chaînes et agglomérats générés lors de la mise en œuvre de deux procédés de soudage

| Procédés | Matériaux | Morphologie des particules | Particules, chaînes et agglomérats | | |
|---|----------------------|----------------------------|------------------------------------|--------------------|------------------------|
| | | | Particules primaires (diamètre) | Chaînes (longueur) | Agglomérats (diamètre) |
| Soudage manuel à l'arc avec électrodes enrobées | Acier CrNi | Sphérique | Jusqu'à 50 nm | Plusieurs μm | Jusqu'à 500 nm |
| | | | Jusqu'à 400 nm | Plusieurs μm | Jusqu'à 500 nm |
| Soudage sous gaz protecteur (MAG/MIG) | Acier CrNi | Sphérique | Jusqu'à 10 nm | Jusqu'à 100 nm | Jusqu'à 100 nm |
| | Alliages d'aluminium | Sphérique | De 10 à 50 nm | – | – |
| | | | Jusqu'à 400 nm | – | – |

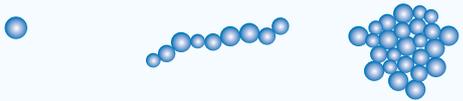
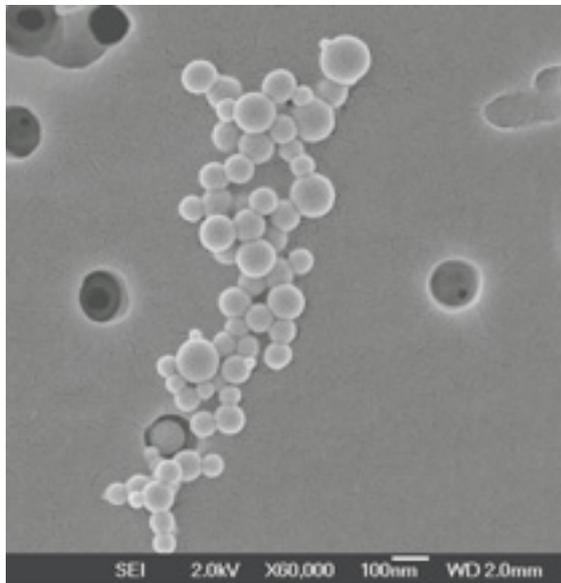



Figure 4. Fumées de soudage observées en microscopie électronique à balayage

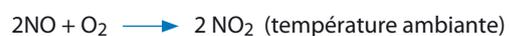
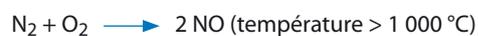
| Processus | Composés émis |
|---------------|---|
| Vaporisation | Métaux (Fe, Cu, Mn, Ni...) |
| Condensation | Métaux (Fe, Cu, Mn, Ni...) |
| Oxydation | Métaux + O ₂ = oxydes (FeO, Fe ₂ O ₃ , CuO...) |
| | N ₂ + O ₂ → 2NO |
| | NO + ½ O ₂ → NO ₂ |
| Décomposition | CO ₂ → CO + ½ O ₂ |
| Pyrolyse | Composés organiques |
| | C _x H _y → C _{x1} H _{y1} |
| | → CO → CH ₂ O |
| Combustion | Composés organiques + O ₂ |
| | C _x H _y $\xrightarrow{O_2}$ CO + H ₂ O |
| | → CO ₂ + H ₂ O |

Figure 5. Quelques exemples de processus physiques et chimiques mis en jeu lors du soudage et des techniques connexes

1.2.1. Les polluants gazeux

Le monoxyde de carbone (CO) se forme, du fait de la décomposition thermique du dioxyde de carbone, lors du soudage sous gaz actif avec du dioxyde de carbone (CO₂) ou du soudage sous gaz actif avec du mélange gazeux (dont une large part de dioxyde de carbone). Il se forme également du monoxyde de carbone lors de toute combustion avec apport d'air insuffisant.

Les oxydes d'azote (NO et NO₂) sont générés suite à l'oxydation de l'azote de l'air (à partir de l'oxygène O₂ et de l'azote N₂ de l'air) à proximité de la flamme ou de l'arc électrique. Le monoxyde d'azote se forme à des températures supérieures à 1 000 °C et s'oxyde dans l'air à température ambiante pour produire du dioxyde d'azote.



Lors de l'utilisation de procédés autogènes (soudage à la flamme, oxycoupage, métallisation, etc.) et lors de mise en œuvre de coupage plasma et laser à l'air comprimé ou à l'azote, des oxydes d'azote (dioxyde d'azote, en particulier) sont générés.

L'ozone (O₃) résulte de la photolyse de l'oxygène de l'air sous l'action de rayonnements ultraviolets. Il se forme en particulier lors du soudage sous gaz protecteur de matériaux fortement réfléchissants (aluminium et alliages aluminium-silicium). La présence d'autres gaz ou poussières dans l'atmosphère accélère la décomposition de l'ozone en oxygène, ce qui explique le fait que la concentration

en ozone est plus élevée dans le cas de l'utilisation de procédés de soudage peu émissifs.



Du phosgène (COCl_2) et du chlorure d'hydrogène (HCl) sont produits lors de la dégradation thermique ou de l'action de rayonnements ultraviolets sur des agents dégraissants contenant des hydrocarbures chlorés.

Enfin, divers gaz sont émis lors du soudage ou du coupage de pièces métalliques revêtues : traitements anticorrosion, peintures, vernis, lubrifiants, décapants, résines, graisses, salissures, traces de solvants, etc. Selon la composition chimique de ces revêtements, il se forme du monoxyde de carbone (CO), du formaldéhyde (HCHO), du diisocyanate de toluylène (TDI), du cyanure d'hydrogène (HCN), du chlorure d'hydrogène (HCl), du benzène (C_6H_6), du styrène (C_8H_8), du pyrène ($\text{C}_{16}\text{H}_{10}$), du xylène (C_8H_{10}), du bisphénol A (BPA), etc.

1.2.2. Les polluants particuliers

Des oxydes de fer (FeO , Fe_2O_3 , Fe_3O_4) issus du matériau d'apport et du métal de base se forment lors du soudage et du coupage de pièces en acier.

De l'oxyde d'aluminium (Al_2O_3) issu du matériau d'apport et du métal de base est émis lors du soudage et du coupage de pièces en aluminium.

Des oxydes de manganèse (MnO , MnO_2 , Mn_2O_3 , Mn_3O_4) sont générés lors de l'utilisation de tous les procédés de soudage à l'arc électrique utilisant des matériaux d'apport contenant du manganèse. La teneur en manganèse du matériau d'apport influe directement sur la teneur des fumées de soudage en oxydes de manganèse. Des études portant sur des travaux de soudage réalisés avec des électrodes dont l'enrobage possède une teneur élevée en manganèse ont montré que les fumées émises contenaient jusqu'à 40 % de manganèse. Des oxydes de manganèse peuvent également être émis lors du soudage ou du coupage d'aciers et d'alliages contenant du cuivre, de l'aluminium et du magnésium.

Des composés du chrome hexavalent (trioxyde de chrome : CrO_3 et chromates : Na_2CrO_4 , K_2CrO_4 , ZnCrO_4 , etc.) sont générés à des concentrations très élevées lors du soudage manuel à l'arc avec électrodes enrobées d'aciers fortement alliés contenant du chrome (aciers inoxydables) ainsi que de pièces présentant un revêtement à base de chromate de zinc, autrefois couramment utilisé. Des composés du chrome hexavalent sont également émis lors de travaux de soudage réalisés avec des fils fourrés contenant du chrome.

Des oxydes de nickel (NiO , NiO_2 , Ni_2O_3) se forment notamment lors du soudage avec du nickel pur ou avec un matériau à base de nickel (matériau d'apport), lors du soudage et du coupage d'aciers inoxydables, d'aciers galvanisés, d'alliages de nickel et de métaux nickelés ainsi que lors de la projection thermique avec un produit à base de nickel.

De l'oxyde de cadmium (CdO) est produit lors du brasage fort avec un produit d'apport contenant du cadmium (brasage à l'argent) et lors du soudage et du coupage de matériaux revêtus de cadmium (pièces cadmiées).

De l'oxyde de béryllium (BeO) se forme lors du soudage et du coupage de matériaux contenant du béryllium (utilisés notamment dans les industries nucléaire et aérospatiale).

De l'oxyde de cobalt (CoO) est généré lors du soudage et du coupage d'alliages contenant du cobalt et lors de la projection thermique avec un produit à base de cobalt.

Des fluorures (CaF_2 , KF , NaF , etc.) sont émis lors de l'utilisation d'électrodes à enrobage basique ou de fils contenant des fluorures. Lors du soudage manuel à l'arc avec électrodes non alliées ou faiblement alliées à enrobage basique, par exemple, la teneur en fluorures des fumées peut atteindre 10 à 20 %.

Des composés du baryum (BaCO_3 , BaF_2) se forment lors du soudage avec des électrodes dont l'enrobage est à base de baryum ou avec des fils fourrés contenant du baryum. Lors du soudage, avec électrodes enrobées, de fonte et d'alliages de cuivre, la teneur en baryum des fumées avoisine 40 %.

De l'oxyde de zinc (ZnO) se forme lors du soudage et du coupage d'aciers galvanisés ou de métaux peints.

De l'oxyde de potassium, de l'oxyde de sodium et du dioxyde de titane (K_2O , Na_2O , TiO_2) peuvent également être produits. Ils sont issus de l'enrobage des électrodes. Du dioxyde de titane peut aussi être présent dans les fumées d'électrodes rutiles.

D'autres oxydes métalliques (oxydes de plomb, de cuivre, de magnésium, d'étain et de molybdène, pentoxyde de vanadium, etc.) se forment lors d'interventions sur ou avec des matériaux contenant ces métaux (provenant, par exemple, de revêtements métalliques, de peintures, d'opérations de réparation sur d'anciennes soudures, du produit d'apport dans le cas de la projection thermique, du flux/du produit d'apport lors du brasage).

Du dioxyde de thorium (ThO_2) est généré au cours de l'affûtage et du polissage des électrodes en tungstène thorié utilisées lors du soudage TIG (technique fréquemment utilisée dans le cas de pièces en aluminium).

1.3. L'émission des fumées

La composition des fumées de soudage et le débit d'émission dépendent de nombreux paramètres, dont certains sont liés entre eux, parmi lesquels :

- le procédé de soudage,
- le diamètre du fil ou de l'électrode, le rendement de l'électrode,
- la composition et l'épaisseur de l'enrobage ou du flux (fils fourrés),
- la composition du fil ou de l'électrode qui, jointe aux caractéristiques précédentes, détermine le risque induit par le produit d'apport,

- les paramètres de soudage : intensité, tension, longueur d'arc, vitesse de déplacement,
- le facteur de marche de l'installation (rapport du temps effectif de soudage au temps de soudage),
- la position de soudage : à plat, en angle, verticale montante,
- la nature de l'opération de soudage : assemblage ou rechargement,
- le débit et la composition du gaz protecteur,
- la composition du métal de base et son préchauffage éventuel,
- la présence de revêtements (contenant du zinc, du plomb, du cadmium, etc.) ou de contaminants sur le métal de base (salissures, traces de solvants, graisses, etc.).

Quatre-vingt-quinze pour cent des constituants des fumées de soudage proviennent des produits d'apport, moins de 5 % du matériau de base.

Dans le cas du coupage, le débit d'émission et la composition des fumées dépendent plus particulièrement de :

- la technique de coupe,
- la vitesse de découpe,
- la pression du gaz de coupe,
- la composition du gaz de coupe.

2 | Réglementation

2.1. L'aération et l'assainissement

L'aération et l'assainissement de l'atmosphère des lieux de travail font l'objet des textes suivants issus du Code du travail : articles R. 4212-1 à 7, R. 4222-1 à 22, R. 4722-1 et 2 et R. 4724-2 et 3 relatifs à l'aération et à l'assainissement [4]. Les locaux dans lesquels s'exercent des travaux de soudage, de coupage, de projection thermique, etc. sont des « locaux à pollution spécifique ».

L'employeur a donc l'obligation de capter les poussières, gaz et vapeurs « *au fur et à mesure de leur production, au plus près de leur source d'émission et aussi efficacement que possible, notamment en tenant compte de la nature, des caractéristiques et du débit des polluants de l'air ainsi que des mouvements de l'air* » (art. R. 4422-12 du Code du travail).

Ces textes réglementaires font l'objet de commentaires et de précisions contenus dans la circulaire du 9 mai 1985 du ministère du Travail, relative au commentaire technique des décrets 84-1093 et 84-1094 du 7 décembre 1984 concernant l'aération et l'assainissement des lieux de travail.

Le contrôle périodique des installations d'aération et d'assainissement fait l'objet de l'arrêté du 8 octobre 1987 du ministère du Travail.

2.2. Le risque chimique

Les règles générales de prévention du risque chimique, établies par les articles R. 4412-1 à R. 4412-58 du Code du travail, doivent être appliquées [5].

Des règles particulières de prévention, prescrites par les articles R. 4412-59 à R. 4412-93 du Code du travail, doivent également être mises en œuvre lors de toute opération exposant à un agent cancérigène, mutagène ou toxique pour la reproduction de catégorie 1A ou 1B. Ces règles spécifiques sont explicitées dans la circulaire DRT n°12 du 24 mai 2006.

Le Centre international de recherche sur le cancer (CIRC) a classé, dès 1990, les fumées de soudage dans le groupe 2B, cancérigène possible pour l'homme.

Plusieurs polluants gazeux et particulaires émis lors de travaux de soudage et de coupage sont également classés cancérigènes par l'Union européenne et/ou par le Centre international de recherche sur le cancer (*voir figure 6 page suivante*).

Ces classifications permettent de connaître le « degré » de cancérigénicité d'un agent répertorié : cancérigène avéré, cancérigène supposé, cancérigène suspecté, etc. (*voir annexe*). Elles sont néanmoins loin d'être exhaustives. Le non classement d'un agent relève, soit d'une situation où l'agent ne présente pas de potentialité cancérigène, soit d'une lacune de connaissances (qui ne doit pas être interprétée comme une absence de danger).

Les dispositions spécifiques applicables aux agents cancérigènes, mutagènes ou toxiques pour la reproduction

Dans ce cadre, les obligations prioritaires des employeurs sont les suivantes :

- Évaluation des risques : nature, niveau et durée de l'exposition à l'agent cancérigène ou mutagène, afin de définir des mesures de prévention et des procédures et méthodes de travail appropriées.
- Substitution obligatoire de la substance dangereuse par un autre produit ou un autre procédé lorsque c'est techniquement possible.
- Travail en système clos lorsque c'est techniquement possible et qu'une substitution n'a pu être mise en place.
- Captage des polluants à la source lorsque la substitution et le travail en système clos ne sont pas applicables.
- Limitation du nombre de travailleurs exposés ou susceptibles de l'être.
- Mise en place de mesures de détection précoces, d'hygiène et de dispositifs en cas d'urgence.
- Délimitation et balisage des zones à risque, étiquetage des récipients.
- Formation et information des travailleurs.
- Suivi médical : surveillance médicale régulière pendant toute la durée de l'activité professionnelle, constitution d'un dossier médical pour chaque travailleur exposé à un agent cancérigène ou mutagène (comportant un double de la fiche de prévention des expositions à la pénibilité établie par l'employeur) et établissement d'une fiche d'aptitude par le médecin du travail.

Les substances ou mélanges classés cancérigènes de catégorie 2 (cancérigènes suspects) ne sont pas visés par ces dispositions ; il convient alors d'appliquer les dispositions générales relatives à la prévention du risque chimique en milieu de travail (articles R. 4412-1 à R. 4412-58).

2.3. Les valeurs limites d'exposition professionnelle

Des niveaux de concentration dans l'atmosphère de travail à ne pas dépasser ou valeurs limites d'exposition professionnelle (VLEP) sont fixés par le ministère chargé du Travail afin de préserver la santé des travailleurs (quelques valeurs sont également recommandées par la Caisse nationale de l'assurance maladie des travailleurs salariés, CNAMTS) [6].

Les valeurs limites d'exposition professionnelle désignent les seuils de concentration qui ne doivent jamais être dépassés dans l'air inhalé par un travailleur. Elles découlent des données scientifiques actuelles dont disposent les spécialistes sur la toxicité des polluants ; elle vise à limiter l'empoussièrement dans les ambiances de travail. En raison de l'évolution incessante de l'état des connaissances

scientifiques, elles ne sauraient constituer une garantie de ne pas développer une pathologie. Ces valeurs limites d'exposition professionnelle sont donc un objectif minimal, il convient de choisir les pratiques et les équipements (notamment les installations de ventilation) visant à abaisser les niveaux d'exposition à des valeurs aussi basses que possible [1], [2].

Certaines valeurs limites d'exposition professionnelle sont réglementaires contraignantes. Elles sont fixées par décret en Conseil d'Etat et intégrées à l'article R. 4412-149 du Code du travail : poussières réputées sans effet spécifique, amiante, plomb, quartz, etc. Pour quelque 400 autres agents chimiques, elles sont indicatives mais doivent être considérées comme des objectifs minimaux pour la prévention.

S'il n'existe pas de valeur limite pour un polluant donné, la réglementation prévoit de se référer à la VLEP réglementaire contraignante définie pour les poussières réputées sans effet spécifique : les concentrations moyennes en poussières totales et alvéolaires de l'atmosphère inhalée par un salarié, évaluées sur une période de 8 heures, ne doivent ainsi pas dépasser respectivement 10 et 5 mg/m³.

Figure 6. La classification des principaux agents cancérigènes rencontrés lors des activités de soudage et des techniques connexes

| Agents cancérigènes | Union européenne | CIRC |
|--|-----------------------|---|
| Béryllium | 1B | 2A |
| Cadmium | 1B | 1 |
| Chrome VI | 1A | 1 |
| Cobalt | – | 2B |
| Dioxyde de titane | – | 2B |
| Formaldéhyde ² | 2 | 1 |
| Nickel | 2 | 2B |
| Certains composés du nickel : oxyde de nickel, dioxyde de nickel, etc. | 1A | – |
| Pentaoxyde de vanadium | – | 2B |
| Plomb | 2 (composés du plomb) | 2B (métal) 2A (dérivés inorganiques) |
| Rayonnements ionisants alpha (thorium) | – | 1 |

2. En France, les travaux exposant au formaldéhyde sont également soumis aux règles particulières de prévention des risques d'exposition aux agents cancérigènes, mutagènes et toxiques pour la reproduction de catégorie 1A ou 1B depuis le 1^{er} janvier 2007 (arrêté du 5 janvier 1993 modifié par l'arrêté du 13 juillet 2006).

En France, la valeur limite d'exposition professionnelle sur huit heures pour la totalité des particules composant les fumées de soudage est de 5 mg/m³. Les valeurs limites d'exposition professionnelle de chaque constituant des fumées doivent également être respectées (voir figure 7).

Figure 7. **Les valeurs limites d'exposition professionnelle des principaux polluants rencontrés lors de travaux de soudage et des techniques connexes (valeurs limites d'exposition mesurées sur une durée maximale de 8 heures / valeurs limites d'exposition à court terme mesurées sur une durée maximale de 15 minutes)**

| Polluants | VLEP (mg/m ³) |
|---|---------------------------|
| Aluminium (fumées de soudage) | 5 |
| Aluminium (Al ₂ O ₃) | 10 |
| Azote (dioxyde) | 6 |
| Azote (monoxyde) | 30 |
| Baryum (composés solubles) | 0,5 |
| Béryllium (et composés) | 0,002 |
| Cadmium (oxyde) | 0,05 |
| Chrome VI (composés du) | 0,05 |
| Cuivre (fumées) | 0,2 |
| Cyanure d'hydrogène | 2 / 10 |
| Dioxyde de titane | 10 |
| Fer (Fe ₂ O ₃ , fumées) | 5 |
| Fluorures | 2,5 |
| Manganèse (Mn ₃ O ₄ , fumées) | 1 |
| Monoxyde de carbone | 55 |
| Nickel (oxyde et trioxyde) | 1 |
| Ozone | 0,2 / 0,4 |
| Phosgène | 0,08 / 0,4 |
| Plomb (métallique et composés) | 0,1 |
| Vanadium | 0,05 |
| Zinc (oxyde, fumées) | 5 |

2.4. Les maladies professionnelles ou à caractère professionnel

Les travaux de soudage, de coupage, de projection thermique, etc. peuvent être à l'origine de maladies professionnelles ou de maladies à caractère professionnel [7].

Certains tableaux de maladies professionnelles mentionnent explicitement les travaux de soudage, coupage et techniques connexes :

n° 1 – Affections dues au plomb et à ses composés, résultant en particulier du soudage sur support recouvert de peintures contenant du plomb,

n° 61 – Maladies professionnelles provoquées par le cadmium et ses composés, résultant en particulier du soudage sur pièces cadmiées.

D'autres tableaux de maladies professionnelles ne mentionnent pas explicitement les travaux de soudage, coupage et techniques connexes, mais peuvent les concerner notamment :

n°6 – Affections provoquées par les rayonnements ionisants,

n° 10, 10 bis et 10 ter – Affections provoquées par l'acide chromique et certains composés du chrome,

n° 32 – Affections professionnelles provoquées par le fluor, l'acide fluorhydrique et ses sels minéraux,

n° 33 – Maladies professionnelles dues au béryllium et à ses composés,

n° 37 – Affections cutanées causées par les oxydes et sels de nickel,

n° 39 – Maladies professionnelles engendrées par le bioxyde de manganèse,

n° 44 – Affections consécutives à l'inhalation de poussières ou de fumées contenant des particules de fer ou d'oxyde de fer,

n° 64 – Intoxication professionnelle par l'oxyde de carbone,

n° 65 – Lésions eczématiformes de mécanisme allergique (colophane),

n° 66 – Rhinite et asthme professionnels (travaux exposant à la colophane chauffée, notamment lors des travaux de brasage en électronique).

3 Effets des fumées sur la santé

Les fumées générées par les procédés de soudage et les techniques connexes peuvent causer des pathologies respiratoires multiples et variées : elles peuvent induire des effets respiratoires aigus (irritations des voies aériennes, fièvre des métaux, etc.), des effets respiratoires chroniques (pneumoconioses, asthmes, bronchites, etc.) et des effets cancérigènes (cancers bronchopulmonaires). Les effets potentiels sur la santé des principaux polluants émis lors du soudage et des techniques connexes sont répertoriés dans la figure 8.

Les fumées de soudage et des techniques connexes peuvent également provoquer des affections au niveau du rein et du système nerveux central.

3.1. Les polluants gazeux

3.1.1. Le monoxyde de carbone

Le monoxyde de carbone (CO) se présente sous la forme d'un gaz incolore, inodore et de densité voisine de celle de l'air. Il est absorbé par les poumons et diffuse à travers les membranes alvéolo-capillaires [8]. Il traverse également les barrières méningée et placentaire et est toxique pour le fœtus (il est classé toxique pour la reproduction de catégorie 1A).

En cas d'intoxication suraiguë ou massive, les symptômes sont la paralysie des membres, le coma, les convulsions et

évoluent rapidement vers le décès en quelques secondes ou minutes. L'intoxication aiguë et subaiguë se manifeste au début par des nausées et vomissements associés souvent à de violentes céphalées puis surviennent de la fatigue, des vertiges ainsi que des troubles de l'humeur et du comportement.

À 150 ml/m³ de CO dans la zone respiratoire, des étourdissements, de la fatigue et des maux de tête sont observés. À 700 ml/m³ surviennent des évanouissements, une augmentation du pouls et du rythme respiratoire, une paralysie respiratoire, voire un arrêt cardiaque puis la mort.

3.1.2. Les oxydes d'azote

À température ambiante :

- le monoxyde d'azote (NO) est un gaz incolore, d'odeur douceâtre ou piquante, perceptible dès 0,3 ppm,
- le dioxyde d'azote (NO₂) est un liquide très volatil jaune-brun ou un gaz rouge-brun, plus lourd que l'air, d'odeur très irritante, perceptible dès 0,11 ppm.

Le monoxyde d'azote [9] est moins toxique que le dioxyde d'azote. Les oxydes d'azote pénètrent dans l'organisme essentiellement par inhalation, mais les passages transcutanés et au cours de contacts oculaires sont possibles. Ces gaz sont des irritants puissants des muqueuses, leur principale cible est l'appareil respiratoire.

Alors que l'intoxication suraiguë est généralement mortelle en quelques instants par arrêt cardiorespiratoire, l'intoxication aiguë évolue le plus souvent en trois phases :

- une irritation plus ou moins marquée des voies aériennes supérieures accompagnée de toux, de dyspnée et de

Figure 8. Les principaux polluants contenus dans les fumées de soudage et des techniques connexes ainsi que leurs effets potentiels sur la santé

| Polluants | | | | | | |
|--|----------------------|--------------------|---------------------------------------|---------------------------|--------------------------|---------------------------|
| Particulaires (à base de ou d'oxydes de) | | | | Gazeux | | |
| Aluminium | Aluminium | Cobalt | Chrome VI | Formaldéhyde ³ | Cyanure | Formaldéhyde ³ |
| Antimoine | Etain | Béryllium | Béryllium | Dioxyde d'azote | d'hydrogène ³ | |
| Baryum | Fer | | Cadmium | Ozone | Monoxyde de | |
| Chrome | Titane | | Cobalt | Phosgène ³ | carbone | |
| Cuivre | | | Nickel | Diisocyanate | Monoxyde | |
| Fluorures | | | Plomb | de toluylène ³ | d'azote | |
| Magnésium | | | Titane | Colophane | | |
| Manganèse | | | Vanadium | | | |
| Molybdène | | | | | | |
| Nickel | | | | | | |
| Plomb | | | | | | |
| Titane | | | | | | |
| Vanadium | | | | | | |
| Zinc | | | | | | |
| Zirconium | | | | | | |
| Irritants | Surcharge pulmonaire | Fibrose pulmonaire | Potentialité cancérigène ⁴ | Irritants | Toxiques | Potentialité cancérigène |
| Toxiques | | | | | Anoxie | |
| Allergisants | | | | | | |
| Atteintes bronchopulmonaires | | | | | | |

3. Gaz générés par les revêtements et contaminants éventuellement présents sur le métal de base (traces de solvant, graisses, etc.).

4. Des particules de thorium peuvent également être générées au cours de l'affûtage et du polissage des électrodes en tungstène thorié (procédé TIG). Le thorium est un métal radioactif qui peut induire des cancers.

nausées et souvent associée à une irritation oculaire. Cette irritation disparaît rapidement dès la fin de l'exposition et passe même parfois inaperçue,

- une phase de récupération plus ou moins asymptomatique,
- une détresse respiratoire avec toux, dyspnée et fièvre en rapport avec un œdème aigu du poumon. Si l'évolution n'est pas fatale, l'épisode aigu peut évoluer vers la guérison ou, si les lésions sont importantes, engendrer des séquelles fonctionnelles (fibrose ou emphysème).

L'exposition prolongée à de faibles concentrations (0,5 à 3,5 ppm) semble favoriser le développement d'infections pulmonaires (emphysème).

3.1.3. L'ozone

L'ozone (O₃) est un gaz incolore ou de couleur bleutée lorsqu'il est en concentration suffisante. Son odeur piquante est caractéristique et décelable dès 0,01 ppm mais avec une accoutumance rapide. Par ailleurs, la présence associée d'oxydes d'azote supprime sa perception.

L'appareil respiratoire est la principale cible de l'ozone mais des atteintes extrapulmonaires peuvent également survenir [10]. Une exposition aiguë induit :

- des atteintes respiratoires qui varient en fonction des concentrations : de la simple anesthésie olfactive transitoire (dès 0,01 ppm) à des lésions pulmonaires sévères (œdème aigu du poumon vers 9 ppm) en passant par une sécheresse buccale, de la toux, une anomalie du rythme respiratoire, une dyspnée plus ou moins intense, etc.,
- des atteintes oculaires, principalement des irritations,
- des atteintes rénales, et notamment des néphrites aiguës,
- des atteintes neurologiques (entre 1 et 2 ppm) : céphalées, vertiges, asthénie, troubles de la coordination des mouvements et de la parole, baisse de la vigilance, etc.

Une exposition répétée peut induire des effets pulmonaires graves : bronchopathies, emphysème, fibrose et troubles neurologiques (faiblesse, maux de tête, troubles de la mémoire, etc.).

3.1.4. Les gaz issus des revêtements et contaminants

Le phosgène (COCl₂) est un gaz incolore ou légèrement jaunâtre, plus lourd que l'air. Son odeur, détectable dès 0,5 à 1 ppm, douce et mal identifiable à faible concentration (pomme pourrie, foin moisi, etc.), devient piquante et suffocante à forte concentration. Un phénomène de fatigue ou d'adaptation olfactive peut intervenir.

Le phosgène est très irritant pour les muqueuses oculaires et respiratoires [11]. Il provoque également une forte irritation cutanée. Les intoxications, même à de faibles concentrations, provoquent des effets pulmonaires sévères. Les intoxications évoluent généralement en trois phases : une irritation oculaire et/ou rhinolaryngée accompagnée de toux, et parfois de vomissements et de douleurs gastriques, une rémission pouvant atteindre 36 heures, et éventuellement un œdème pulmonaire.

La colophane

Lors des travaux de brasage tendre, les opérateurs sont principalement exposés aux produits de dégradation des flux utilisés. Les flux résineux, toujours très employés, sont composés de colophane.

Une exposition aux vapeurs de colophane engendre des affections respiratoires de mécanisme allergique type asthme. Des eczéma et des dermites de contact allergiques ont également été rapportés.

La symptomatologie asthmatiforme débute en moyenne plusieurs années après le début de l'exposition, mais le délai de sensibilisation est largement fonction de l'exposition et varie de quelques semaines à plus de vingt ans.

Certaines intoxications sont mortelles, d'autres peuvent laisser des séquelles pulmonaires invalidantes.

Les conséquences d'une exposition chronique au phosphogène sont encore mal connues.

Le cyanure d'hydrogène (HCN) se présente sous la forme d'un gaz incolore d'odeur caractéristique d'amande amère, détectable dès 0,58 ppm.

L'exposition aiguë au cyanure d'hydrogène peut revêtir trois formes cliniques [12] :

- une forme foudroyante (200 à 400 ppm) dont les effets sont immédiats : la mort survient en quelques minutes,
- une forme aiguë qui se caractérise par une perte de connaissance brutale, parfois précédée de céphalées, de vertiges, d'ébriété, d'une angoisse intense et de convulsions. L'évolution se fait rapidement vers un coma profond associé à une cyanose, parfois à un œdème aigu pulmonaire puis un arrêt cardiorespiratoire,
- une forme légère qui se résume à de l'anxiété et de l'angoisse, à quelques sensations vertigineuses avec ébriété, hébétude, état confusionnel, voire à une discrète gêne respiratoire.

Une exposition répétée au cyanure d'hydrogène induit divers troubles généraux (céphalées, vertiges, perte de poids, etc.), digestifs (nausées, vomissements, etc.), oculaires (conjonctivites), sensoriels et endocriniens.

Le formaldéhyde (HCHO) est un gaz incolore, d'odeur piquante et suffocante.

Il est irritant pour les muqueuses oculaires et les voies respiratoires [13]. Il est également un puissant allergène et peut être responsable de sensibilisations cutanées (eczéma, urticaire, etc.) et respiratoires (rhinite, asthme, etc.), voire d'un choc anaphylactique.

Il est suspecté d'induire des cancers nasopharyngés et des leucémies (il est classé cancérigène de catégorie 2 par l'Union européenne et 1 par le CIRC, les travaux exposant au formaldéhyde sont également classés cancérigènes en France).

Le diisocyanate de toluylène (TDI) présente une odeur piquante et pénétrante, il est détectable aux alentours de 1 ppm.

Une exposition brève et massive induit des irritations parfois sévères des muqueuses oculaires (conjonctivite, kératite), des voies aériennes supérieures (rhinite, pharyngite) et parfois digestives [14]. Des douleurs thoraciques, une toux ainsi que des vertiges, des céphalées et des troubles de conscience et de l'équilibre sont également observés. Dans les cas les plus graves, un œdème pulmonaire lésionnel peut survenir.

Une exposition répétée à des concentrations faibles peut être à l'origine d'une sensibilisation, provoquant des maladies allergiques respiratoires et cutanées : eczéma, asthme, etc. Des bronchopneumopathies chroniques obstructives ont également été rapportées.

3.2. Les polluants particuliers

3.2.1. Les polluants particuliers toxiques, irritants ou allergisants

Les oxydes de fer (FeO, Fe₂O₃, Fe₃O₄)

Une exposition régulière et prolongée (10 à 15 ans) à des oxydes de fer, dans un environnement où la ventilation est notamment insuffisante, peut générer une surcharge pulmonaire qui est susceptible d'induire une pneumoconiose nommée sidérose. La sidérose du soudeur à l'arc a été décrite pour la première fois en 1936 [15].

La sidérose pulmonaire pure est la plus souvent observée chez le soudeur. Il s'agit d'une pneumoconiose de surcharge simple, bénigne, c'est-à-dire dans laquelle il n'existe aucune atteinte fonctionnelle respiratoire. Généralement, la sidérose pulmonaire pure a une évolution favorable à l'arrêt de l'exposition.

Mais quelques cas de sidéroses avec fibrose pulmonaire (sidéroscléroses) ont également été rapportés chez les soudeurs. Dans ces atteintes, il existe une symptomatologie clinique (toux, expectoration muqueuse ou mucopurulente, parfois douleurs thoraciques et dyspnée d'effort) et des modifications des épreuves fonctionnelles. L'évolution peut se faire vers une insuffisance cardiaque droite.

L'oxyde d'aluminium (Al₂O₃)

Une exposition à l'oxyde d'aluminium notamment lors de travaux de soudage à l'arc réalisés sur de l'aluminium peut provoquer une surcharge pulmonaire qui est susceptible d'induire une pneumoconiose nommée aluminose. La survenue de cette pathologie est davantage liée à l'intensité qu'à la durée de l'exposition. L'évolution de l'aluminose cesse en même temps que l'exposition mais les lésions demeurent.

Des irritations des voies respiratoires ont également été rapportées.

De même, l'inhalation d'oxyde d'aluminium peut affecter la mémoire et les fonctions supérieures du système nerveux qui commandent la vigilance.

L'oxyde d'étain (SnO₂)

Une exposition à l'oxyde d'étain peut induire des effets irritatifs locaux aux niveaux des yeux et des voies respiratoires : conjonctivite, rhinite, dyspnée, etc.

À long terme, une surcharge pulmonaire à l'origine éventuelle d'une pneumoconiose nommée stannose peut être observée.

Les oxydes de manganèse (MnO, MnO₂, Mn₂O₃, Mn₃O₄)

Une exposition aiguë par inhalation à des poussières ou des fumées d'oxydes de manganèse induit une irritation intense avec alvéolite caustique (dyspnée, toux, cyanose) [16].

Les signes d'une intoxication chronique aux oxydes de manganèse apparaissent après plusieurs mois ou années d'exposition. Les troubles provoqués sont essentiellement nerveux (manganisme chronique) et respiratoires (pneumonie manganique).

Trois phases peuvent être distinguées dans l'apparition des troubles nerveux :

- une phase d'installation insidieuse et progressive avec une symptomatologie peu précise : anorexie, asthénie, trouble du sommeil, céphalées, etc.,
- une phase clinique précoce marquée par des troubles psychiques, neurologiques et moteurs : irritabilité, troubles de la parole et de la démarche, apathie, etc.,
- une phase d'état : démarche hésitante et spasmodique, incoordination motrice, tremblements, incertitude d'écriture, etc.

L'arrêt de l'exposition peu après l'apparition des signes neurologiques (deuxième phase) induit la régression de nombreux symptômes. En revanche, si l'exposition ne cesse qu'à la phase d'état, les lésions cérébrales sont irréversibles.

Les troubles respiratoires incluent une inflammation alvéolaire aiguë avec une dyspnée intense, une toux et une cyanose importante. L'atteinte respiratoire est totale. L'évolution vers une détresse respiratoire est possible et la mort peut survenir dans un état de collapsus. Il n'y a pas d'altération permanente du poumon type fibrose. Une incidence plus élevée de bronchites aiguës et de maladies pulmonaires chroniques non spécifiques a été rapportée.

Les fluorures (NaF, CaF₂, KF, etc.)

Une exposition aiguë aux fluorures par inhalation provoque une irritation de tout le tractus respiratoire : saignement du nez, gêne respiratoire, toux, voire œdème du poumon (à des concentrations très élevées) [17].

Sur la peau, les fluorures provoquent de graves irritations dont les signes peuvent survenir de façon retardée. Ils peuvent également être à l'origine d'importantes lésions oculaires.

La fluorose osseuse est la conséquence la plus grave d'une intoxication chronique (cette pathologie a été presque exclusivement observée dans l'industrie de l'aluminium). Elle se caractérise par une condensation ligamentaire et osseuse.

Parmi les autres symptômes imputés aux fluorures, des troubles respiratoires (dyspnée paroxystique allergique) et des atteintes chroniques des bronches ont été rapportés.

Les oxydes de cuivre et de zinc (CuO et ZnO)

Une exposition aux oxydes de cuivre et de zinc [18] peut provoquer « la fièvre des métaux ». Les symptômes apparaissent dans les heures qui suivent l'exposition : une fièvre élevée, des frissons, des myalgies, une irritation des voies aériennes supérieures, une toux et une oppression thoracique.

L'évolution est favorable en 24 à 48 heures, mais les symptômes peuvent réapparaître après une nouvelle exposition. Parfois, un phénomène de tolérance survient, les symptômes s'atténuent alors que l'exposition persiste mais peuvent réapparaître après un arrêt plus ou moins prolongé de l'exposition.

Les composés du baryum (BaO₃, BaF₂)

Les composés du baryum présents dans les fumées de soudage sont principalement des composés solubles dans l'eau ou en milieu acide.

Les symptômes d'une intoxication aiguë aux composés du baryum par inhalation sont similaires à ceux par ingestion [19] : troubles digestifs, nausées, vomissements et asthénie. Peuvent également survenir des crampes, des contractures musculaires, une paralysie progressive des quatre membres et des voies aériennes supérieures, des troubles cardiovasculaires, etc.

Les études menées sur des populations professionnelles exposées de manière chronique sont relativement rares ou anciennes.

Les oxydes de molybdène (MoO) et de magnésium (MgO)

Une exposition à l'oxyde de molybdène et à l'oxyde de magnésium peut générer une irritation des muqueuses et, notamment, des muqueuses nasales ainsi que des conjonctivites.

L'inhalation d'oxyde de magnésium peut également jouer un rôle dans la survenue de « la fièvre des métaux ».

3.2.2. Les polluants particuliers cancérigènes

Les composés du chrome hexavalent (chrome VI)

Une exposition aiguë aux composés du chrome hexavalent peut induire une irritation des muqueuses respiratoires, notamment de la muqueuse nasale, mais aussi une irritation pulmonaire entraînant des douleurs thoraciques, une toux, une dyspnée et une cyanose. Les niveaux précis d'exposition engendrant ces effets ne sont pas déterminés [20], [21].

Par contact avec la peau, les composés du chrome VI peuvent provoquer des brûlures sévères.

L'atteinte oculaire se traduit habituellement par des conjonctivites, mais les projections de poussières peuvent

également entraîner des lésions sévères de la cornée (œdème, opacification).

L'inhalation chronique et le contact répété avec la peau de composés du chrome VI induisent des pathologies connues depuis longtemps.

Au niveau des voies respiratoires, des atrophies, des ulcérations de la muqueuse nasale sont fréquentes, surtout en cas d'hygiène personnelle insuffisante avec apport du chrome au niveau du nez par les doigts. Elles aboutissent souvent à des perforations de la cloison nasale. Des rhinites chroniques avec saignement de nez, des laryngites et des pharyngites mais aussi des ulcérations bronchiques et des bronchites persistantes sont également observées.

Au niveau cutané, des ulcérations caractéristiques peu étendues mais profondes peuvent survenir ; leur guérison est lente et laisse souvent des cicatrices rétractiles. Des dermites eczématiformes sont également rapportées.

Il est possible enfin de rencontrer des effets digestifs (œsophagites, gastro-entérites, ulcères gastroduodénaux).

Plusieurs études épidémiologiques démontrent un risque accru de cancer pulmonaire, notamment chez les ouvriers de l'électrolyse et de la production de chromates et de pigments à base de chromates.

Les oxydes de nickel (NiO, NiO₂, Ni₂O₃)

Plusieurs intoxications aiguës aux oxydes de nickel par inhalation ont été rapportées, dont certaines ont engendré des détresses respiratoires sévères qui se sont avérées mortelles.

Les effets chroniques respiratoires des oxydes de nickel ont été largement étudiés, certains travaux montrent ainsi un excès de bronchites chroniques ou de perturbations des fonctions respiratoires [22].

Plusieurs études montrent une augmentation du risque de cancer du poumon ainsi que des cavités nasales chez des sujets exposés aux oxydes de nickel. Les temps de latence sont longs : 10 à 20 ans pour le cancer du poumon et 25 à 35 ans (voire plus) pour le cancer des cavités nasales.

Il n'y a actuellement pas de données chez l'homme sur la toxicité éventuelle des oxydes de nickel sur la reproduction.

L'oxyde de cadmium (CdO)

Une intoxication aiguë par inhalation peut passer inaperçue (pas d'odeur marquée, ni d'effet irritant immédiat). Après une période asymptomatique de plusieurs heures, apparaissent des signes d'irritation intense des voies respiratoires (toux, douleurs thoraciques, etc.), des signes digestifs (nausées, vomissements) accompagnés de frissons, de céphalées, de fièvre, etc. Le tableau peut s'aggraver rapidement vers un œdème aigu pulmonaire sévère susceptible de causer la mort [23], [24].

Le cadmium est un toxique cumulatif : son élimination très lente explique l'évolution progressive des manifestations pathologiques, même après l'arrêt de l'exposition. Les principaux organes atteints sont les reins, les poumons et le tissu osseux. Le rein est ainsi l'organe le plus sensible aux oxydes de cadmium chez l'homme.

Une exposition chronique à l'oxyde de cadmium par inhalation peut être à l'origine de rhinite, de laryngite, d'hyposmie, de bronchite chronique et d'emphysème. Les enquêtes épidémiologiques ont mis en évidence une augmentation significative de la mortalité par maladies respiratoires chez les travailleurs exposés de façon répétée à des fumées présentant de très fortes concentrations. Au niveau osseux, l'oxyde de cadmium peut induire une déminéralisation diffuse du squelette et des douleurs du bassin et des membres inférieurs.

Plusieurs travaux indiquent une augmentation de la mortalité par cancer bronchique et prostatique chez les travailleurs exposés au cadmium et à l'oxyde de cadmium.

L'oxyde de béryllium (BeO)

Le béryllium est très toxique chez l'homme [25].

Les intoxications aiguës ou subaiguës se caractérisent par les troubles respiratoires suivants :

- irritations rhinopharyngées, avec rhinite, larmolement, toux sèche avec sensation de brûlure, etc. qui peuvent régresser rapidement après la cessation de l'exposition,
- bronchopneumopathie aiguë, avec dyspnée importante, toux, fièvre modérée et asthénie. L'évolution est généralement favorable en trois à quatre mois mais des complications sont possibles (œdème aigu ou fibrose pulmonaires) ; des cas mortels ont été signalés.

Une pneumopathie chronique « retardée » (« béryllose ») accompagnée parfois de signes cutanés et de manifestations rénales peut être provoquée par une exposition prolongée à des concentrations faibles d'oxyde de béryllium. Les signes apparaissent progressivement. Des complications peuvent survenir : défaillance cardiaque, pneumothorax spontané, etc. L'évolution peut se terminer par un syndrome gravissime d'insuffisance cardiorespiratoire.

Une augmentation des tumeurs pulmonaires a également été rapportée.

L'oxyde de cobalt (CoO)

Une exposition aiguë peut induire un syndrome irritatif respiratoire (toux sèche, dyspnée, éternuements et conjonctivite). Ces manifestations disparaissent à l'arrêt de l'exposition [26].

Pour des expositions de quelques mois à plusieurs dizaines d'années, des cas de rhinites et d'asthmes ont été rapportés, ainsi que des alvéolites et des fibroses.

Plusieurs études montrent une augmentation de la mortalité par cancer bronchopulmonaire, néanmoins les salariés n'étaient pas uniquement exposés au cobalt mais à un mélange cobalt, carbures métalliques frittés, voire d'autres composés.

L'oxyde de plomb (PbO)

L'inhalation massive de fumées contenant de l'oxyde de plomb se manifeste par des troubles digestifs, essentiellement œsophagite et gastrite, entraînant des vomissements, des douleurs abdominales, des diarrhées, des troubles rénaux, etc. [27]. La gravité de cette intoxication est liée aux effets neurologiques qui associent une encéphalopathie, des signes d'hypertension intracrânienne et parfois un coma convulsif.

Les intoxications aiguës et subaiguës peuvent également induire un dysfonctionnement ovulaire, des avortements, une prématurité ainsi qu'une augmentation de la mortalité et de la morbidité postnatales.

Une exposition chronique peut provoquer une anémie, des troubles de l'appareil digestif (nausées, vomissements, « coliques au plomb », etc.), une altération des fonctions cognitives, ainsi qu'une néphropathie tubulaire interstitielle.

Les principales pathologies qui peuvent être rencontrées chez les salariés amenés à effectuer des travaux de soudage, de coupage, de brasage, etc.

| | Polluants | |
|-------------------------------|---|---|
| Pathologies aiguës | Œdème pulmonaire | Ozone, oxyde d'azote, phosgène |
| | Fièvre des métaux | Oxydes de zinc, de cuivre et de magnésium |
| | Asthme | Colophane, diisocyanate de toluylène, formaldéhyde |
| Pathologies chroniques | Pneumonie toxique | Oxydes de manganèse, oxyde de cadmium, oxyde de béryllium |
| | Pneumoconiose | Oxydes de fer, oxyde d'aluminium, oxyde d'étain, oxyde de béryllium |
| | Bronchite chronique | Oxydes d'azote, ozone, composés du chrome VI, oxydes de nickel, oxydes de manganèse, oxyde de cadmium |
| | Atteinte du système nerveux central | Oxyde d'aluminium, oxydes de manganèse |
| | Atteinte rénale | Oxyde de cadmium, oxyde de plomb, dioxyde de thorium |
| Cancer bronchopulmonaire* | Oxydes de nickel, composés du chrome VI, oxyde de cadmium, oxyde de béryllium | |

*La survenue de cancers bronchopulmonaires chez les soudeurs reste discutée. Plusieurs études et méta-analyses retrouvent un risque relatif de cancer du poumon de 1,3 environ chez les soudeurs. Deux facteurs de confusion ont été fréquemment évoqués pour expliquer cet excès de cancer du poumon : le tabagisme et l'amiante.

Les études épidémiologiques ne montrent pas d'augmentation significative du risque cancérogène. Toutefois une méta-analyse récente de ces études révèle un faible accroissement de l'incidence de certains cancers (poumons et estomac et, de façon plus douteuse, vessie) chez des sujets fortement exposés.

Le dioxyde de titane (TiO₂)

Une exposition au dioxyde de titane peut générer une irritation des voies respiratoires et une surcharge pulmonaire qui est susceptible de provoquer une pneumoconiose.

Le dioxyde de titane est par ailleurs suspecté d'induire des cancers pulmonaires, comme l'ont montré des études récentes menées chez l'animal. À ce jour, les études effectuées chez l'homme n'évoquent pas de lien entre l'exposition professionnelle au dioxyde de titane et l'augmentation du risque de cancer.

Le pentoxyde de vanadium (V₂O₅)

Les effets d'une exposition aiguë au pentoxyde de vanadium par inhalation sont dose-dépendants et de gravité croissante. Les symptômes sont une rhinite et une irritation de la gorge lors d'une exposition aiguë légère, auxquels s'ajoutent une dyspnée et des effets sur le tractus gastro-intestinal et la peau lors d'une exposition aiguë modérée. Des effets pulmonaires, cardiaques et du système nerveux peuvent également survenir lors d'une exposition aiguë sévère.

Une exposition chronique peut provoquer des effets locaux type irritation des voies respiratoires et de la muqueuse oculaire ainsi qu'une bronchite et de l'emphysème pulmonaire.

Une augmentation de l'incidence des cancers broncho-alvéolaires a été rapportée chez l'animal exposé au pentoxyde de vanadium.

Le dioxyde de thorium (ThO₂)

L'exposition à cet élément radioactif se fait principalement par inhalation (voire par ingestion) lors de l'affûtage et du polissage des électrodes en tungstène thorié (procédé TIG). Une partie est alors excrétée par les urines et les fèces. Le reste est stocké dans les os, les poumons, les ganglions, le foie et les reins [28].

Plusieurs études montrent une augmentation significative du risque cancérogène lors d'expositions professionnelles au dioxyde de thorium. Une exposition prolongée et répétée par inhalation peut ainsi provoquer la survenue d'un angiosarcome hépatique, d'un lymphome ou d'un sarcome osseux. Le pouvoir cancérogène du dioxyde de thorium résulte essentiellement de l'émission de particules alpha par contamination radioactive interne et de sa rémanence pendant plusieurs années dans les organes précités.

4 | Polluants émis selon les procédés et les matériaux

La composition chimique et le débit d'émission des fumées dépendent du procédé et des matériaux mis en œuvre. Les fumées sont ainsi composées d'un mélange de polluants gazeux et particulaires de nature chimique et de toxicité diverses et variées. Les émissions de fumées sont généralement moins importantes lors du soudage que lors du coupage ou de la projection thermique.

4.1. Le soudage

4.1.1. Le soudage à la flamme (soudage oxyacétylénique)

Lors du soudage oxyacétylénique [29] d'aciers non alliés ou faiblement alliés, il se forme principalement, comme lors de la mise en œuvre d'autres procédés autogènes, des oxydes d'azote, et notamment du dioxyde d'azote (voir figure 9).

La concentration en dioxyde d'azote dans l'atmosphère des lieux de travail croît avec la longueur de la flamme, et donc avec la taille de la torche de soudage ainsi qu'avec la distance laissée entre la buse et la pièce. Elle peut être jusqu'à dix fois plus élevée dans le cas d'une flamme brûlant librement que dans le cas d'une flamme de 15 mm de longueur. Cette concentration peut également s'avérer très élevée dans un espace confiné, voire dans un atelier exigu, peu ou pas ventilé. Lors du soudage oxyacétylénique, le débit d'émission en oxydes d'azote peut atteindre 40 mg/s.

Seul le soudage de métaux non ferreux (plomb, cuivre, etc.) ou de pièces dont les revêtements sont constitués de ces métaux peut induire l'émission de polluants particulaires.



Figure 9. Opération de soudage à la flamme

4.1.2. Le soudage manuel à l'arc avec électrodes enrobées

Le soudage manuel à l'arc avec électrodes enrobées [30] est le procédé qui génère le plus de fumées par rapport à la quantité de métal d'apport déposé (voir figure 10).

Acier non allié ou faiblement allié (teneur en éléments d'alliage inférieure à 5 %)

Le soudage manuel à l'arc avec des électrodes enrobées en acier non allié ou faiblement allié génère des quantités importantes de polluants particuliers (par rapport, par exemple, au soudage oxyacétylénique).

La composition chimique des fumées reflète celle de l'âme et de l'enrobage de l'électrode. Les principaux constituants des fumées sont l'oxyde de fer (Fe_2O_3), le dioxyde de silicium (SiO_2), l'oxyde de potassium (K_2O), l'oxyde de manganèse (MnO), l'oxyde de sodium (Na_2O), le dioxyde de titane (TiO_2) et l'oxyde d'aluminium (Al_2O_3).



Figure 10. **Opération de soudage à l'arc avec électrodes enrobées**

Ces polluants sont présents en pourcentage variable selon le type d'enrobage (acide, rutile, basique, cellulosique) de l'électrode. Les fumées générées lors de l'utilisation d'électrodes à enrobage basique contiennent, en outre, de l'oxyde de calcium (CaO) et des fluorures (voir figure 11). Les fumées produites lors de l'utilisation d'électrodes à enrobage acide contiennent jusqu'à 10 % d'oxyde de manganèse, qui peut ainsi devenir l'un des composants principaux des fumées. Dans le cas d'électrodes spéciales contenant du cuivre, de l'oxyde de cuivre peut également être présent dans les fumées.

Lors du soudage manuel à l'arc avec électrodes enrobées en acier non allié ou faiblement allié, le débit d'émission des fumées varie de 4 à 18 mg/s.

Acier chrome-nickel (teneur en chrome inférieure ou égale à 20 % et teneur en nickel inférieure ou égale à 30 %)

Les électrodes enrobées en acier fortement allié contiennent, en plus du fer et des produits d'enrobage, jusqu'à 20 % de chrome et jusqu'à 30 % de nickel.

Lors du soudage manuel à l'arc avec des électrodes enrobées en acier fortement allié, il se forme des fumées pouvant contenir jusqu'à 16 % de composés du chrome. Il s'agit en majorité de chrome VI sous forme de chromates, agent classé cancérigène de catégorie 1A par l'Union européenne (jusqu'à 90 %). L'oxyde de nickel est nettement sous-représenté (de 1 % jusqu'à, exceptionnellement, 3 %). Les fumées des électrodes à enrobage basique contiennent par ailleurs nettement plus de chrome VI que les fumées des électrodes à enrobage rutile.

Lors du soudage manuel à l'arc avec des électrodes enrobées en acier fortement allié, le débit d'émission des fumées se situe entre 2 et 22 mg/s.

Nickel, alliages de nickel (teneur en nickel supérieure à 30 %)

Lors du soudage manuel à l'arc avec des électrodes enrobées en nickel ou à base de nickel, les fumées contiennent principalement de l'oxyde de nickel, 5 % au maximum (les

| Polluants | Type d'enrobage | | | |
|-------------------------|-----------------|---------|---------|--------------|
| | acide | rutile | basique | cellulosique |
| Na_2O | 2 – 4 | 2 – 4 | 2 – 4 | 2 – 4 |
| Al_2O_3 | 1 – 2 | 1 – 2 | 1 – 2 | 1 – 2 |
| SiO_2 | 30 – 40 | 30 – 40 | ≈ 10 | ≈ 10 |
| K_2O | 10 – 20 | 10 – 20 | 20 – 30 | — |
| CaO | 1 – 2 | 1 – 2 | 15 – 20 | — |
| TiO_2 | < 1 | ≈ 5 | ≈ 1 | ≈ 1,5 |
| MnO | ≈ 10 | ≈ 7 | ≈ 6 | ≈ 5 |
| Fe_2O_3 | ≈ 40 | 20 – 30 | 20 – 30 | 70 – 80 |
| F | — | — | 12 – 16 | — |

Figure 11. **La composition (exprimée en pourcentage) des fumées émises lors du soudage manuel à l'arc avec électrodes enrobées en acier non allié ou faiblement allié (selon la norme DIN 1913)**

oxydes de nickel sont classés cancérigènes de catégorie 1A par l'Union européenne).

Outre l'oxyde de nickel, les fumées peuvent être composées – selon le type d'alliage (présence de cuivre, par exemple) – d'oxyde de cuivre. De l'oxyde de cobalt peut également être généré lors du rechargement par soudage réalisé avec des électrodes contenant du cobalt.

Lors du soudage manuel à l'arc avec des électrodes enrobées en nickel ou à base de nickel, le débit d'émission des fumées avoisine 7 mg/s.

4.1.3. Le soudage à l'arc sous protection gazeuse

Les procédés sous gaz actif (MAGC⁵, MAGM⁶) donnent lieu à un fort dégagement de polluants particulaires. Les émissions sont proches de celles observées lors du soudage manuel à l'arc avec électrodes enrobées.

Les techniques sous gaz inerte (MIG⁷, TIG⁸), en revanche, émettent nettement moins de fumées.

Selon les produits d'apport et les gaz protecteurs utilisés, il se forme des fumées dont la composition varie.

Le procédé le plus émissif est le soudage à l'arc avec fil fourré, en particulier avec le fil fourré rutile et avec le fil fourré sans protection gazeuse.

4.1.3.1. Le soudage sous protection gazeuse MIG et MAG

→ Influence du gaz protecteur utilisé sur les émissions de fumées

• Le soudage sous gaz actif avec dioxyde de carbone (MAGC)

Lors du soudage MAG avec comme gaz protecteur du dioxyde de carbone sur des aciers non ou faiblement alliés, il se forme du monoxyde de carbone. Le monoxyde de carbone résulte de la décomposition thermique du dioxyde de carbone utilisé comme gaz protecteur. Les polluants particulaires émis sont principalement des oxydes de fer.

Lors du soudage MAGC d'aciers non ou faiblement alliés, les débits d'émission sont compris entre :

- 2 et 12 mg/s pour les fumées de soudage,
- 2 et 12,5 mg/s pour le monoxyde de carbone.

• Le soudage sous gaz actif avec mélange de gaz (MAGM)

Si le mélange de gaz utilisé lors du soudage MAGM sur aciers non ou faiblement alliés contient du dioxyde de carbone, un dégagement de monoxyde de carbone est attendu. Les polluants particulaires générés sont principalement des oxydes de fer.

Lors du soudage MAGM réalisé sur des aciers chrome-nickel, de l'oxyde de nickel et des composés du chrome sont émis. Les fumées de soudage contiennent jusqu'à



© Serge Morillon/NRS

Figure 12. Opération de soudage à l'arc sous protection gazeuse

17 % de composés du chrome et jusqu'à 5 % d'oxyde de nickel, mais les composés du chrome sont, dans ce cas, presque exclusivement du chrome trivalent, considéré comme non cancérigène.

• Le soudage sous gaz inerte (MIG)

Les émissions de fumées sont, dans la plupart des cas, plus faibles lors du soudage MIG que lors du soudage MAG.

Lors du soudage MIG sur des matériaux en aluminium, outre le dégagement d'oxyde d'aluminium, de l'ozone est généré, sa formation étant favorisée par les rayonnements ultraviolets et les matériaux fortement réfléchissants. Les concentrations d'ozone sont plus élevées dans le cas d'alliages aluminium-silicium que dans le cas d'aluminium pur, et nettement plus élevées que dans le cas d'alliages aluminium-magnésium.

Lors du soudage MIG de nickel et d'alliages à base de nickel, de l'oxyde de nickel est généré.

Les débits d'émission sont alors compris entre :

- 2 et 6 mg/s pour les fumées de soudage,
- jusqu'à 5 mg/s pour l'oxyde de nickel.

Dans le cas du soudage MIG d'alliages à base de nickel contenant du cuivre, les émissions de fumées sont plus importantes que dans le cas du soudage MIG d'alliages à base de nickel contenant d'autres éléments tels que le chrome, le cobalt, le molybdène, etc.. Ces fumées contiennent, outre de l'oxyde de nickel, une proportion élevée d'oxyde de cuivre.

→ Influence du type d'électrode employée sur les émissions de fumées

Lors du soudage MAG/MIG avec fil fourré, les dégagements de fumées sont plus importants que lors du soudage MAG/MIG avec fil plein (voir figure 12). L'utilisation de fils fourrés sans gaz protecteur provoque également des émissions de fumées beaucoup plus élevées que l'utilisation de fils fourrés sous gaz protecteur.

5. Metal arc active gas welding with CO₂

6. Metal arc active gas welding with mixed gas

7. Metal arc inert gas welding

8. Tungsten inert gas arc welding

Figure 13. Les principaux constituants des fumées émis lors du soudage MAG/MIG en fonction de la nature du matériau d'apport

| Matériaux d'apport | Principal(aux) constituant(s) des fumées |
|--|--|
| Fil fourré basique non allié ou faiblement allié (sous gaz protecteur) | Oxyde de manganèse |
| Fil fourré fortement allié | Composés du chrome VI |
| Fil fourré non allié ou faiblement allié (sans gaz protecteur) | Oxyde de manganèse Composés du baryum (selon le type de fil fourré) |

Lors du soudage MAG d'aciers non alliés ou faiblement alliés, les débits d'émission sont, par exemple, compris entre :

- 2 et 12 mg/s pour le fil plein,
- 6 et 54 mg/s pour le fil fourré sous gaz protecteur,
- jusqu'à 97 mg/s pour le fil fourré sans gaz protecteur.

La composition des fumées de soudage varie selon la nature du matériau d'apport (voir figure 13).

4.1.3.2. Le soudage sous protection gazeuse MAG haute performance

Dans ce procédé, la vitesse de dévidage du fil est supérieure à 15 m/min, et le taux de dépôt de matière est supérieur à 8 kg/h. Lorsque le taux de dépôt de matière ou la vitesse de dévidage du fil croît, les émissions de polluants augmentent. Plus l'apport de chaleur (d'énergie) est élevé dans le procédé, plus les émissions sont importantes.

Les énergies mises en œuvre sont plus faibles lors de l'utilisation comme matériau d'apport d'un fil plein que lors de l'emploi d'une bande ; les émissions sont donc plus élevées dans ce dernier cas.

Les émissions croissent avec la tension et avec la vitesse de dévidage du fil. Par conséquent, des émissions plus importantes sont attendues dans le cas des arcs rotatifs, et plus faibles dans le cas des arcs courts (voir figure 14).

Les polluants émis lors du soudage sous protection gazeuse MAG haute performance sont identiques à ceux générés lors du soudage MAG.

4.1.3.3. Le soudage sous protection gazeuse avec électrode réfractaire (TIG)

Lors du soudage TIG (voir figure 15), les émissions de fumées sont relativement faibles, ce qui favorise la formation

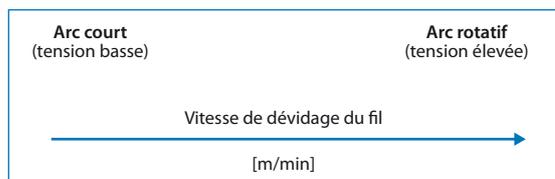


Figure 14. La vitesse de dévidage du fil en fonction du type d'arc



Figure 15. Opération de soudage à l'arc sous protection gazeuse avec électrode réfractaire

d'ozone. Les concentrations d'ozone sont particulièrement élevées (quoique plus faibles que dans le soudage MIG) dans le cas du soudage d'aluminium pur et, plus encore, d'alliages aluminium-silicium.

Lors du soudage TIG de nickel et d'alliages à base de nickel, de l'oxyde de nickel est généré.

Lors de l'utilisation d'électrodes en tungstène thorié, des poussières de thorium peuvent également être émises suite à leur affûtage. Le thorium est un métal radioactif cancérigène. Il convient donc d'éviter l'emploi de telles électrodes et de les remplacer, si le contexte le permet, par des électrodes en tungstène au lanthane. L'utilisation d'électrodes en tungstène thorié à usage unique peut également être envisagée.

4.1.4. Le soudage par résistance

Lors du soudage par résistance sur différents matériaux, les fumées émises contiennent principalement des oxydes métalliques. Les débits d'émission sont modérés.

La présence d'huile ou de graisse sur les pièces se traduit par des dégagements de fumées plus importants, comportant par ailleurs des substances organiques. La quantité de fumées générée est ainsi près de 30 % plus élevée dans le cas du soudage de pièces enduites de graisse que dans le cas de pièces non enduites.

Le soudage bout à bout par résistance est plus émissif que les autres procédés de soudage par résistance (soudage par points, par exemple).

4.1.5. Le soudage laser à gaz CO₂

4.1.5.1. Le soudage laser sans matériau d'apport

L'énergie intense de la source laser provoque la fusion et la vaporisation du matériau de base. La composition des émissions correspond donc globalement à celle du matériau de base.

Des exemples de débits d'émission de polluants particuliers sont indiqués dans la *figure 16* lors du soudage laser de plusieurs matériaux. Les émissions de polluants particuliers et gazeux sont les plus élevées lors du soudage laser d'aciers galvanisés. Les fumées proviennent alors principalement de la couche de zinc qui recouvre l'acier.

4.1.5.2. Le rechargement par soudage laser

Dans le rechargement par soudage laser, le matériau d'apport est sous forme de fil ou de poudre. Les fumées émises sont constituées principalement de polluants particuliers. Peu de polluants gazeux sont produits lors de l'utilisation de ce procédé.

Lorsque le matériau d'apport est une poudre, il se forme, également, des polluants particuliers inhalables mais non alvéolaires.

Généralement, les débits d'émission de polluants particuliers lors du rechargement par soudage laser sont inférieurs à 5 mg/s.

La composition des fumées correspond globalement à celle du matériau d'apport ; les éléments à bas point d'ébullition étant toutefois surreprésentés (*voir figure 17*).

Lors du rechargement par soudage laser sur :

- des alliages à base de cobalt, de l'oxyde de cobalt est émis,
- des alliages à base de nickel contenant 10 % de cobalt, de l'oxyde de nickel et de l'oxyde de cobalt, mais également de l'oxyde d'aluminium sont générés,
- des alliages à base de fer contenant une forte teneur en chrome, de l'oxyde de fer est également produit. Le chrome est, quant à lui, présent principalement sous forme métallique ou sous forme d'oxyde trivalent (chrome III). Les concentrations en chrome hexavalent (chrome VI) sont très faibles ($\leq 5\%$ du chrome total),
- du bronze d'aluminium, de l'oxyde de cuivre est principalement émis (en raison de la forte teneur en cuivre du bronze, environ 75 %) ainsi que de l'oxyde d'aluminium.

4.1.6. Le soudage laser à solide Nd : YAG

Les débits d'émission sont plus faibles, lorsque les paramètres de soudage sont optimisés, avec les lasers à solide Nd : YAG⁹ qu'avec les lasers à gaz CO₂ ; toutefois, les lasers Nd : YAG ne permettent pas d'atteindre des vitesses de soudage aussi élevées que les lasers à gaz CO₂.

La quantité de polluants particuliers formés dépend de l'intensité absorbée au niveau de la zone d'interaction. Plus l'intensité est élevée, plus la température de fusion et, donc, le taux de vaporisation augmentent.

Les débits d'émission de fumées lors du soudage laser à solide Nd : YAG (l'intensité du faisceau se situe entre $3,18 \times 10^5$ et $6,67 \times 10^5$ W/cm²) :

- d'aciers chrome-nickel (épaisseur de la pièce = 3 mm, vitesse de progression = 600 mm/min) sont de 1,5 mg/s,
- d'aciers galvanisés (épaisseur de la pièce = 1 mm, vitesse de progression = 400 mm/min) sont de 2,7 mg/s.

9. Neodymium-doped yttrium aluminium garnet (grenat d'yttrium-aluminium dopé au néodyme).

Figure 16. Exemples de débits d'émission de polluants particuliers et gazeux émis lors du soudage laser de différents matériaux

| | Polluants particuliers (mg/s) | Polluants gazeux (µg/s) | | |
|------------------------------------|-------------------------------|-------------------------|----|-----------------------|
| | | NO _x | CO | O ₃ |
| Acier non allié | 1,5 | 200 | 56 | 53 |
| Acier chrome-nickel (X5 CrNi 18 9) | 1,2 | 350 | 28 | 19 |
| Acier galvanisé | 7 | 800 | 56 | < limite de détection |
| Titane | 0,9 | – | – | – |

(épaisseur du matériau = 1 mm, puissance du laser = 2900 W, focale = 200 mm, vitesse de progression = 50 mm/s, gaz utilisé : argon)

Figure 17. Les constituants principaux des fumées émises lors du soudage laser à gaz CO₂

| Procédé | Matériau de base | Constituant principal des fumées |
|-------------------------------------|--|----------------------------------|
| Soudage laser (sans métal d'apport) | Acier non allié, faiblement allié (éléments d'alliage < 5 %) | Oxydes de fer |
| | Acier chrome-nickel ($\leq 20\%$ Cr et $\leq 30\%$ Ni) | Oxyde de nickel |
| | Acier galvanisé | Oxyde de zinc |
| Procédé | Matériau d'apport | Constituant principal des fumées |
| Rechargement par soudage laser | Alliages à base de cobalt (> 60 % Co, > 20 % Cr) | Oxyde de cobalt |
| | Alliages à base de nickel (> 60 % Ni) | Oxyde de nickel |
| | Alliages à base de fer (< 40 % Cr, > 60 % Fe) | Oxydes de fer |
| | Bronzes d'aluminium ($\approx 75\%$ Cu) | Oxyde de cuivre |

Le soudage laser-plasma de pièces en aluminium

Cette combinaison de procédés permet d'accroître sensiblement la vitesse de soudage. Elle peut être utilisée, par exemple, pour le soudage de l'aluminium, soit avec un laser à gaz CO₂, soit avec un laser à solide Nd : YAG. Les dégagements de polluants sont plus élevés que lors du soudage laser seul. La composition des fumées dépend des matériaux de base.

Dans le cas du soudage de l'aluminium, de l'ozone et de l'oxyde d'aluminium sont ainsi principalement générés.

4.1.7. Le soudage hybride

Le soudage hybride, combinant deux procédés, est de plus en plus utilisé. Les techniques les plus connues sont les suivantes : laser + MIG, laser + TIG, plasma + MIG, plasma + TIG, laser + plasma.

Ces procédés mixtes présentent des performances en termes de fusion des métaux et de vitesse de progression bien supérieures à celles de chaque procédé pris séparément.

Les débits d'émission de polluants attendus sont donc plus importants que lors d'un soudage MIG ou TIG.

4.2. Le coupage

Plusieurs procédés de coupage existent : le coupage à la flamme (ou oxycoupage), le coupage plasma et le coupage laser. Les polluants particuliers émis dépendent de la composition du matériau de base. Leur diamètre est généralement supérieur à celui des polluants particuliers générés lors du soudage mais ils appartiennent néanmoins à la fraction alvéolaire.

4.2.1. Le coupage à la flamme

Le coupage à la flamme sur des aciers non alliés ou faiblement alliés est particulièrement émissif [29]. Le débit d'émission et la composition des fumées dépendent plus particulièrement de :

- la technique de coupe,
- la vitesse de découpe,
- la pression du gaz de coupe,
- la composition du gaz de coupe.

Outre les oxydes de fer, les fumées contiennent généralement des oxydes d'azote. Le débit d'émission des fumées varie entre 10 et 50 mg/s.

4.2.2. Le coupage plasma

Ce procédé s'accompagne généralement d'une forte émission de polluants particuliers.

Les principaux polluants émis lors des différents procédés de soudage en fonction des métaux d'apport

| Procédé | Matériau d'apport | Constituant(s) principal(aux) des fumées |
|---|--|--|
| Soudage à la flamme | Acier non allié, faiblement allié (éléments d'alliage < 5 %) | Dioxyde d'azote |
| Soudage manuel à l'arc avec électrodes enrobées | Acier non allié, faiblement allié (éléments d'alliage < 5 %) | Oxydes de fer |
| | Acier chrome-nickel ($\leq 20\%$ Cr et $\leq 30\%$ Ni) | Composés du chrome VI Oxyde de manganèse* |
| | Nickel, alliages nickel (> 30 % Ni) | Oxyde de nickel Oxyde de cuivre |
| Soudage MAG avec dioxyde de carbone (MAGC) | Acier non allié, faiblement allié (éléments d'alliage < 5 %) | Oxydes de fer Monoxyde de carbone |
| Soudage MAG avec mélange gazeux (MAGM) | Acier non allié, faiblement allié (éléments d'alliage < 5 %) | Oxydes de fer |
| | Acier chrome-nickel fil plein ($\leq 20\%$ Cr et $\leq 30\%$ Ni) | Oxyde de nickel Oxyde de manganèse* |
| | Acier chrome-nickel fil fourré ($\leq 20\%$ Cr et $\leq 30\%$ Ni) | Composés du chrome VI Oxyde de manganèse* |
| Soudage MIG | Nickel, alliages nickel (> 30 % Ni) | Oxyde de nickel Oxyde de cuivre Ozone |
| | Aluminium pur, alliages aluminium-silicium | Ozone Oxyde d'aluminium |
| | Autres alliages d'aluminium | Oxyde d'aluminium Ozone |
| Soudage TIG | Acier non allié, faiblement allié (éléments d'alliage < 5 %) | Oxydes de fer Ozone |
| | Acier chrome-nickel ($\leq 20\%$ Cr et $\leq 30\%$ Ni) | Oxydes de nickel Ozone |
| | Nickel, alliages nickel (> 30 % Ni) | Ozone Oxydes de nickel |
| | Aluminium pur, alliages aluminium-silicium | Ozone Oxyde d'aluminium |
| | Autres alliages d'aluminium | Oxyde d'aluminium Ozone |

* Lorsque le pourcentage de manganèse dans l'alliage ou dans l'ensemble « alliage et enrobage/fourrage » est $\geq 5\%$.

Figure 18. Les débits d'émission des fumées lors du coupage laser à gaz CO₂ de différents matériaux

| Matériau | Débits d'émission des fumées (mg/s) | |
|------------------------|-------------------------------------|------------------------|
| | Gaz de coupe : azote | Gaz de coupe : oxygène |
| Acier faiblement allié | – | 17 |
| Acier chrome-nickel | 8 | 20 |
| Acier galvanisé | 4,5 | 9 |

(puissance = 1 kW, focale = 63,5 mm, épaisseur du matériau = 1 mm)

Les polluants émis dépendent principalement du matériau de base découpé, des paramètres de découpe adoptés et de la nature du gaz plasmagène utilisé.

Une augmentation de la vitesse de coupe (mm/min) conduit à une réduction de l'émission de polluants (g/min).

Lors du coupage d'acier non ou faiblement allié, les fumées sont principalement composées d'oxydes de fer. Lors du coupage d'acier chrome-nickel, de l'oxyde de nickel, mais également des composés du chrome VI, sont générés. Le coupage de nickel et d'alliages à base de nickel se traduit par de forts dégagements d'oxyde de nickel. Enfin, dans le cas de matériaux contenant de l'aluminium et de matériaux fortement réfléchissants (alliages aluminium-silicium, par exemple), de l'ozone est également émis.

Lorsque l'air comprimé ou l'azote sont utilisés comme gaz plasmagène, du dioxyde d'azote peut également être produit.

4.2.3. Le coupage laser

Du fait de la complexité des procédés et des matériels, le dégagement de polluants lors du coupage laser dépend de nombreux facteurs. Outre les matériaux utilisés et les paramètres adoptés, la source laser joue un rôle important dans l'émission et la composition des fumées.

4.2.3.1. Le coupage laser à gaz CO₂

Les principaux paramètres qui influent sur la quantité de polluants émis sont l'épaisseur de la pièce, la focale de la lentille, la pression du gaz de coupe, la puissance du laser et la vitesse de coupe.

Plus la pièce est épaisse et/ou la focale de la lentille élevée et/ou la pression du gaz de coupe élevée et/ou la puissance du laser élevée, plus l'émission de fumées est importante.

L'augmentation de la vitesse de coupe se traduit :

- par une augmentation des émissions de polluants particulaires par unité de temps (mg/s),
- par une diminution des émissions de polluants particulaires par longueur de coupe (mg/m).

Il se forme dans l'ensemble lors du coupage laser des quantités de polluants particulaires relativement importantes, qui sont toutefois plus faibles que lors du coupage à la flamme ou du coupage plasma.

Les émissions de polluants sont les plus élevées au cours du coupage laser d'aciers chrome-nickel. Le coupage

d'aciers galvanisés induit des émissions plus importantes que le coupage d'aciers non alliés.

Lors du coupage laser à gaz CO₂ (puissance = 1 kW), les débits d'émission de fumées, pour une même épaisseur de matériau de base, sont :

- 16 à 24 mg/s pour un acier non allié,
- 14 à 35 mg/s pour un acier chrome-nickel.

En fonction des polluants émis, il est possible de distinguer :

- le coupage laser (haute pression) avec l'azote comme gaz de coupe,
- le coupage laser avec l'oxygène comme gaz de coupe.

L'utilisation d'azote comme gaz de coupe permet, dans le cas de l'acier chrome-nickel et de l'acier galvanisé, de réduire de près de moitié les émissions de polluants par rapport à l'emploi d'oxygène (voir figure 18).

4.2.3.2. Le coupage laser à solide Nd : YAG

Les émissions de polluants sont plus faibles lors de l'utilisation d'un laser à solide Nd:YAG que lors de l'emploi d'un laser à gaz CO₂ ; cependant, les vitesses de coupe pouvant être atteintes avec un laser à solide Nd:YAG sont plus faibles qu'avec un laser à gaz CO₂.

Les dégagements (mg/m) ont tendance à augmenter avec l'épaisseur de la pièce. L'utilisation d'azote comme gaz de coupe permet de réduire notablement le débit d'émission des fumées de coupage laser (laser à solide) comme indiqué dans la figure 19.

Les paramètres influençant la quantité de polluants émis sont l'intensité absorbée, la pression du gaz de coupe, la vitesse de coupe, le rendement de l'installation et l'épaisseur de la pièce.

Les dégagements de polluants gazeux sont très importants lors du coupage d'une pièce en acier chrome-nickel

Figure 19. Les débits d'émission des fumées lors du coupage laser à solide Nd:YAG de différents matériaux

| Matériau | Débits d'émission des fumées (mg/s) | |
|--|-------------------------------------|---------------------------|
| | Gaz de coupe : azote | Gaz de coupe : oxygène |
| Acier chrome-nickel (I = 2,98 x 10 ⁶ W/cm ²) | (v = 850 mm/min) ≈ 2 | (v = 400 mm/min) ≈ 2,7 |
| Al Mg 3 (I = 1,89 x 10 ⁶ W/cm ²) | (v = 200 mm/min) ≈ 0,3 | – |

(épaisseur du matériau = 1 mm, I = intensité du faisceau, v = vitesse de progression)

Les principaux polluants émis lors du coupage à la flamme, plasma et laser de différents matériaux

| Procédé | Matériau de base | Constituant(s) principal(aux) des fumées |
|----------------------------------|--|--|
| Coupage à la flamme | Acier non allié ou faiblement allié (éléments d'alliage < 5 %) | Oxydes de fer Dioxyde d'azote |
| Coupage plasma* Coupage laser | Acier non allié, faiblement allié (éléments d'alliage < 5 %) | Oxydes de fer |
| | Acier chrome-nickel ($\leq 20\%$ Cr et $\leq 30\%$ Ni) | Oxyde de nickel |
| | Nickel, alliages nickel ($> 30\%$ Ni) | Oxyde de nickel |
| | Matériaux à base d'aluminium** | Oxyde d'aluminium Ozone |

* En cas d'utilisation d'air comprimé ou d'azote comme gaz plasmagènes, du dioxyde d'azote est également émis.

**Matériaux à base d'aluminium : aluminium pur, alliages d'aluminium.

de 1 mm d'épaisseur à la vitesse de 400 mm/min avec de l'oxygène comme gaz de coupe. Les débits d'émission sont de 0,17 ppm/s pour l'ozone, de 0,00155 ppm/s pour le monoxyde d'azote et de 0,041 ppm/s pour le monoxyde de carbone.

Les quantités de polluants particuliers émis lors de l'utilisation de laser à solide Nd:YAG sont comparables à celles générées lors du soudage MIG.

L'utilisation, dans le futur, de lasers à solide Nd:YAG dotés d'une puissance élevée (1 000 W, par exemple) devrait induire des débits d'émission supérieurs à ceux rencontrés lors de l'emploi du laser à gaz CO₂.

4.3. La projection thermique

Lors de la projection thermique, il se forme des polluants particuliers dont la quantité, très élevée, dépend du procédé mis en œuvre. La projection thermique plasma est le procédé le plus émissif, puis vient la projection thermique à l'arc électrique et enfin la projection thermique à la flamme.

Les polluants émis sont uniquement fonction du matériau à déposer. Le métal de base n'influe ni sur la quantité, ni sur la composition des polluants générés.

4.3.1. La projection thermique à la flamme (ou métallisation)

Lors de la projection thermique à la flamme avec un matériau à déposer sous forme de fil ou de poudre, il se forme des polluants gazeux et particuliers. La composition chimique des polluants particuliers présents dans les fumées est fonction de celle du matériau à déposer.

Comme pour les autres procédés autogènes, il faut tenir compte, dans la métallisation, de la formation d'oxydes d'azote.

Lors de la projection thermique à la flamme de matériaux à déposer fortement alliés (chrome < 27 %, Ni < 22 %), de grandes quantités de polluants particuliers sont émises,

avec une forte teneur en oxydes de nickel (concentrations en oxydes de nickel généralement supérieures à 0,5 mg/m³). Divers composés du chrome VI sont également générés.

Lors de la projection thermique à la flamme de matériaux à déposer à base de nickel et de ses alliages, de l'oxyde de nickel est également produit (concentrations en oxyde de nickel généralement supérieures à 0,5 mg/m³).

Pour un même taux de déposition, les émissions sont plus importantes dans le cas de matériau à déposer à base d'alliages chrome-nickel que d'alliages de zinc ou d'aluminium.

4.3.2. La projection thermique à l'arc électrique

La projection thermique à l'arc électrique s'accompagne d'importantes émissions de polluants particuliers. Le diamètre des particules est, en outre, plus petit dans l'ensemble que celui des particules produites lors de la projection thermique à la flamme ; la fraction alvéolaire est donc plus élevée.

Pour des paramètres de projection comparables et un même taux de déposition, les dégagements de polluants sont plus importants lors de l'utilisation d'un fil d'aluminium que lors de l'emploi de fils de zinc, de chrome-nickel ou de bronze d'aluminium (les émissions de polluants étant alors similaires pour ces trois derniers fils).

Lors de la projection thermique à l'arc avec un matériau à déposer en chrome-nickel ou à base de nickel, de l'oxyde de nickel est principalement généré.

4.3.3. La projection thermique plasma

La projection thermique plasma induit des émissions de polluants encore plus importantes que la projection thermique à l'arc électrique, en raison d'une vitesse de projection beaucoup plus élevée.

Des polluants particulièrement dangereux (chrome VI, oxyde de nickel, oxyde de cobalt, etc.) peuvent ainsi être générés dans des quantités notables lors de la mise en

Les principaux polluants émis lors des différents procédés de projection thermique en fonction des matériaux à déposer

| Procédé | Matériau à déposer | Constituant(s) principal(aux) des fumées |
|--|--|--|
| Projection thermique à la flamme (métallisation) | Acier non ou faiblement allié (éléments d'alliage < 5 %) | Oxydes de fer Dioxyde d'azote |
| | Acier chrome-nickel (≤ 27 % Cr et ≤ 22 % Ni) | Oxyde de nickel Dioxyde d'azote |
| | Nickel et alliages de nickel (> 60 % Ni) | Oxyde de nickel Dioxyde d'azote |
| | Aluminium et alliages d'aluminium | Oxyde d'aluminium Dioxyde d'azote |
| | Alliages de plomb | Oxyde de plomb Dioxyde d'azote |
| | Cuivre et alliages de cuivre | Oxyde de cuivre Dioxyde d'azote |
| Projection thermique à l'arc électrique | Acier non ou faiblement allié (éléments d'alliage < 5 %) | Oxydes de fer |
| | Acier chrome-nickel (≤ 27 % Cr et ≤ 22 % Ni) | Oxyde de nickel |
| | Nickel et alliages de nickel (> 60 % Ni) | Oxyde de nickel |
| | Aluminium et alliages d'aluminium | Oxyde d'aluminium |
| | Cuivre et alliages de cuivre | Oxyde de cuivre |
| Projection thermique plasma | Alliages cuivre-aluminium et cuivre-étain | Oxyde de cuivre |
| | Acier chrome-nickel (≤ 27 % Cr et ≤ 22 % Ni) | Oxyde de nickel Ozone |
| | Nickel alliages de nickel (> 60 % Ni) | Oxyde de nickel |
| | Alliages à base de cobalt (> 50 % Co) | Oxyde de cobalt |

œuvre de la projection thermique plasma, en fonction des matériaux à déposer utilisés.

4.4. Le brasage

La quantité et la composition chimique des fumées de brasage dépendent des métaux et alliages d'apport, des flux et des paramètres du procédé (température de brasage, durée du brasage et durée du palier de brasage).

On distingue le brasage tendre et le brasage fort selon que la température de fusion du métal d'apport est respectivement inférieure à 450 °C ou supérieure à 450 °C.

4.4.1. Le brasage tendre (température < 450 °C)

L'émission de polluants dépend avant tout, dans le cas du brasage tendre, de la température de travail (voir figure 20).

Les fumées de brasage tendre contiennent peu de polluants particulaires en raison du fait que les températures généralement atteintes (hormis avec le chalumeau à gaz) sont situées entre 180 et 250 °C.

Le plomb commence à se volatiliser vers 550 °C et l'étain, l'argent et le cuivre bien au-delà. En revanche, les fumées sont composées des produits de dégradation des flux

utilisés. Ainsi, les principaux polluants émis sont la colophane et ses produits de décomposition, car de nombreux flux sont à base de colophane [31]. À des températures élevées, des oxydes métalliques peuvent être émis : oxydes de plomb, de cadmium, composés de l'étain, etc.

Selon le flux utilisé, il peut, en outre, se former de l'hydrazine, des fluorures, des chlorures, de l'isopropanol, etc.

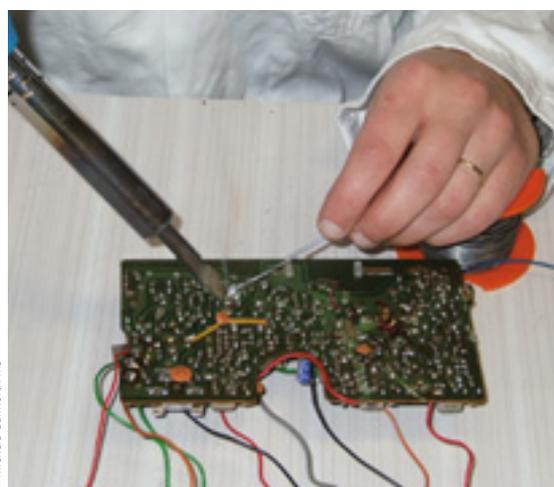


Figure 20. Opération de brasage tendre sur des circuits imprimés dans le secteur de l'électronique

4.4.2. Le brasage fort (température > 450 °C)

Lors du brasage fort, les produits d'apport sont généralement composés d'alliages cuivre-zinc pouvant inclure du nickel, de l'étain, de l'argent et du cadmium. Les flux, quant à eux, contiennent un mélange d'acides boriques, de fluorures, d'oxyfluorures et de borax.

Les polluants particuliers émis sont les suivants, selon les métaux d'apport et les flux utilisés : oxyde de cadmium, oxyde de cuivre, oxyde de zinc, oxyde d'argent, fluorures, chlorures, oxyde de bore, oxyde de nickel, oxyde d'antimoine, composés de l'étain, etc.

4.4.3. Le brasage MIG, brasage laser et brasage plasma (température > 900 °C)

Dans ces procédés, le matériau d'apport est généralement un fil d'alliage à base de cuivre, dont le point de fusion est inférieur à celui du métal de base. Il s'agit, par exemple, de CuSi 3 (Si 3 %, Mn 1 %, Cu reste), de AlBz 8 (Al 8,2 %, Cu reste), etc.

Les polluants particuliers émis proviennent du matériau d'apport, le métal de base n'étant pas porté à son point de fusion.

Acier galvanisé

Lors du traitement d'aciers galvanisés, les fumées contiennent une forte proportion d'oxyde de zinc provenant du revêtement (par vaporisation et oxydation). Il se forme également de grandes quantités d'oxyde de cuivre provenant du matériau d'apport.

Le brasage MIG induit les débits d'émission de polluants les plus élevés alors que le brasage plasma engendre les débits d'émission les plus faibles. Ainsi, lors du brasage MIG, avec CuSi 3 (diamètre du fil = 1 mm) et une couche de zinc de 45 µm, le débit d'émission est de 4,7 mg/s.

Acier fortement allié (chrome-nickel)

Le principal constituant des fumées est, dans ce cas, l'oxyde de cuivre. Dans le brasage MIG avec un fil de diamètre égal à 1 mm, le débit d'émission des fumées est de l'ordre de 2,4 mg/s.

Lors des brasages plasma et laser, les émissions sont beaucoup plus faibles que lors du brasage MIG avec le même matériau d'apport.

Les principaux polluants émis lors des différents procédés de brasage en fonction des matériaux de base et d'apport

| Procédé | Matériau de base | Matériau d'apport | Constituant(s) principal(aux) des fumées |
|----------------|---------------------|-------------------|--|
| Brasage MIG | Acier galvanisé | CuSi 3 | Oxyde de cuivre Oxyde de zinc |
| | Acier chrome-nickel | AlBz 8 | Oxyde de cuivre |
| Brasage laser | Acier galvanisé | CuSi 3 | Oxyde de cuivre Oxyde de zinc |
| | Acier chrome-nickel | AlBz 8 | Oxyde de cuivre |
| Brasage plasma | Acier galvanisé | CuSi 3 | Oxyde de cuivre Oxyde de zinc |
| | Acier chrome-nickel | AlBz 8 | Oxyde de cuivre |

Classification de la Commission européenne : nouveau système (règlement CLP n° 1272/2008 du 16 décembre 2008), obligatoire depuis le 1^{er} décembre 2010

Catégorie 1A : substance dont le potentiel cancérigène pour l'être humain est avéré ; la classification dans cette catégorie s'appuyant largement sur des données humaines.

Catégorie 1B : substance dont le potentiel cancérigène pour l'être humain est supposé ; la classification dans cette catégorie s'appuyant largement sur des données animales.

Catégorie 2 : substance suspectée d'être cancérigène pour l'homme.

Classification du Centre international de recherche sur le cancer

Groupe 1 : substance cancérigène pour l'homme.

Groupe 2A : substance probablement cancérigène pour l'homme.

Groupe 2B : substance cancérigène possible pour l'homme.

Groupe 3 : substance ne pouvant être classée du point de vue de sa cancérigénicité pour l'homme.

Groupe 4 : substance probablement non cancérigène pour l'homme.

BIBLIOGRAPHIE

- | | | |
|---|--|--|
| [1] • <i>Opérations de soudage à l'arc et de coupage</i> . Guide pratique de ventilation n°7. ED 668, INRS, 2007 | [10] • <i>Ozone</i> . FT 43, INRS, 1997 | [21] • <i>Soudage / brasage des métaux</i> . FAR 15, INRS, 2009 |
| [2] • <i>Principes généraux de ventilation</i> . Guide pratique de ventilation n°0. ED 695, INRS, 1989 | [11] • <i>Phosgène</i> . FT 72, INRS, 2008 | [22] • <i>Nickel et ses oxydes</i> . FT 68, INRS, 2009 |
| [3] • <i>Les appareils de protection respiratoire. Choix et utilisation</i> . ED 6106, INRS, 2011 | [12] • <i>Cyanure d'hydrogène et solutions aqueuses</i> . FT 4, INRS, 2011 | [23] • <i>Cadmium et composés minéraux</i> . FT 60, INRS, 1997 |
| [4] • <i>Aération et assainissement des ambiances de travail</i> . Aide-mémoire juridique. TJ 5, INRS, 2007 | [13] • <i>Aldéhyde formique et solutions aqueuses</i> . FT 7, INRS, 2011 | [24] • <i>Cadmium. Brasage à l'argent</i> . FAS 14, INRS, 2008 |
| [5] • <i>Prévention du risque chimique sur les lieux de travail</i> . Aide-mémoire juridique. TJ 23, INRS, 2006 | [14] • <i>Diisocyanate de toluylène</i> . FT 46, INRS, 2006 | [25] • <i>Béryllium et composés minéraux</i> . FT 92, INRS, 2006 |
| [6] • <i>Valeurs limites d'exposition professionnelle aux agents chimiques en France</i> . Aide-mémoire technique. ED 984, INRS, 2007 | [15] • I. Thaon et coll – <i>Risques toxicologiques et pathologies professionnelles liés au soudage métallique</i> . Toxicologie-Pathologie professionnelle. 16-538-B-10, 2001 | [26] • <i>Cobalt et composés minéraux</i> . FT 128, INRS, 2008 |
| [7] • <i>Les maladies professionnelles</i> . ED 835, INRS, 2010 | [16] • <i>Dioxyde de manganèse</i> . FT 52, INRS, 1997 | [27] • <i>Plomb et composés minéraux</i> . FT 59, INRS, 2006 |
| [8] • <i>Monoxyde de carbone</i> . FT 47, INRS, 2009 | [17] • <i>Fluorures alcalins et alcalino-terreux</i> . FT 191, INRS, 2007 | [28] • <i>Oxyde de thorium. Soudage TIG</i> . FAS 20, INRS, 2008 |
| [9] • <i>Monoxyde d'azote, peroxyde d'azote</i> . FT 133, INRS, 2006 | [18] • <i>Zinc et composés minéraux</i> . FT 75, INRS, 2002 | [29] • <i>Soudage et coupage au chalumeau</i> . ED 742, INRS, 2009 |
| | [19] • <i>Baryum et composés</i> . FT 125, INRS, 2001 | [30] • <i>Le soudage manuel à l'arc avec électrodes enrobées</i> . ED 83, INRS, 2011 |
| | [20] • <i>Trioxyde de chrome</i> . FT 1, INRS, 2009 | [31] • <i>Le brasage tendre</i> . ED 122, INRS, 2005 |

Pour obtenir en prêt les audiovisuels et multimédias et pour commander les brochures et les affiches de l'INRS, adressez-vous au service Prévention de votre CARSAT, CRAM ou CGSS.

Services Prévention des CARSAT et des CRAM

CARSAT ALSACE-MOSELLE

(67 Bas-Rhin)
14 rue Adolphe-Seyboth
CS 10392
67010 Strasbourg cedex
tél. 03 88 14 33 00
fax 03 88 23 54 13
prevention.documentation@carsat-am.fr
www.carsat-alsacemoselle.fr

(57 Moselle)
3 place du Roi-George
BP 31062
57036 Metz cedex 1
tél. 03 87 66 86 22
fax 03 87 55 98 65
www.carsat-alsacemoselle.fr

(68 Haut-Rhin)
11 avenue De-Lattre-de-Tassigny
BP 70488
68018 Colmar cedex
tél. 03 88 14 33 02
fax 03 89 21 62 21
www.carsat-alsacemoselle.fr

CARSAT AQUITAINE

(24 Dordogne, 33 Gironde,
40 Landes, 47 Lot-et-Garonne,
64 Pyrénées-Atlantiques)
80 avenue de la Jallère
33053 Bordeaux cedex
tél. 05 56 11 64 36
fax 05 57 57 70 04
documentation.prevention@carsat-aquitaine.fr
www.carsat.aquitaine.fr

CARSAT AUVERGNE

(03 Allier, 15 Cantal, 43 Haute-Loire,
63 Puy-de-Dôme)
48-50 boulevard Lafayette
63058 Clermont-Ferrand cedex 1
tél. 04 73 42 70 76
fax 04 73 42 70 15
preven.carsat@orange.fr
www.carsat-auvergne.fr

CARSAT BOURGOGNE et FRANCHE-COMTÉ

(21 Côte-d'Or, 25 Doubs, 39 Jura,
58 Nièvre, 70 Haute-Saône,
71 Saône-et-Loire, 89 Yonne,
90 Territoire de Belfort)
ZAE Cap-Nord, 38 rue de Cracovie
21044 Dijon cedex
tél. 08 21 10 21 21
fax 03 80 70 52 89
prevention@carsat-bfc.fr
www.carsat-bfc.fr

CARSAT BRETAGNE

(22 Côtes-d'Armor, 29 Finistère,
35 Ille-et-Vilaine, 56 Morbihan)
236 rue de Châteaugiron
35030 Rennes cedex
tél. 02 99 26 74 63
fax 02 99 26 70 48
drpcdi@carsat-bretagne.fr
www.carsat-bretagne.fr

CARSAT CENTRE

(18 Cher, 28 Eure-et-Loir, 36 Indre,
37 Indre-et-Loire, 41 Loir-et-Cher, 45 Loiret)
36 rue Xaintrailles
45033 Orléans cedex 1
tél. 02 38 81 50 00
fax 02 38 79 70 29
prev@carsat-centre.fr
www.carsat-centre.fr

CARSAT CENTRE-OUEST

(16 Charente, 17 Charente-Maritime,
19 Corrèze, 23 Creuse, 79 Deux-Sèvres,
86 Vienne, 87 Haute-Vienne)
4 rue de la Reynie
87048 Limoges cedex
tél. 05 55 45 39 04
fax 05 55 45 71 45
cirp@carsat-centreouest.fr
www.carsat-centreouest.fr

CRAM ÎLE-DE-FRANCE

(75 Paris, 77 Seine-et-Marne,
78 Yvelines, 91 Essonne,
92 Hauts-de-Seine, 93 Seine-Saint-Denis,
94 Val-de-Marne, 95 Val-d'Oise)
17-19 place de l'Argonne
75019 Paris
tél. 01 40 05 32 64
fax 01 40 05 38 84
prevention.atmp@cramif.cnamts.fr
www.cramif.fr

CARSAT LANGUEDOC-ROUSSILLON

(11 Aude, 30 Gard, 34 Hérault,
48 Lozère, 66 Pyrénées-Orientales)
29 cours Gambetta
34068 Montpellier cedex 2
tél. 04 67 12 95 55
fax 04 67 12 95 56
prevdoc@carsat-lr.fr
www.carsat-lr.fr

CARSAT MIDI-PYRÉNÉES

(09 Ariège, 12 Aveyron, 31 Haute-Garonne,
32 Gers, 46 Lot, 65 Hautes-Pyrénées,
81 Tarn, 82 Tarn-et-Garonne)
2 rue Georges-Vivent
31065 Toulouse cedex 9
tél. 0820 904 231 (0,118 €/min)
fax 05 62 14 88 24
doc.prev@carsat-mp.fr
www.carsat-mp.fr

CARSAT NORD-EST

(08 Ardennes, 10 Aube, 51 Marne,
52 Haute-Marne, 54 Meurthe-et-Moselle,
55 Meuse, 88 Vosges)
81 à 85 rue de Metz
54073 Nancy cedex
tél. 03 83 34 49 02
fax 03 83 34 48 70
service.prevention@carsat-nordest.fr
www.carsat-nordest.fr

CARSAT NORD-PICARDIE

(02 Aisne, 59 Nord, 60 Oise,
62 Pas-de-Calais, 80 Somme)
11 allée Vauban
59662 Villeneuve-d'Ascq cedex
tél. 03 20 05 60 28
fax 03 20 05 79 30
bedprevention@carsat-nordpicardie.fr
www.carsat-nordpicardie.fr

CARSAT NORMANDIE

(14 Calvados, 27 Eure, 50 Manche,
61 Orne, 76 Seine-Maritime)
Avenue du Grand-Cours, 2022 X
76028 Rouen cedex
tél. 02 35 03 58 22
fax 02 35 03 60 76
prevention@carsat-normandie.fr
www.carsat-normandie.fr

CARSAT PAYS DE LA LOIRE

(44 Loire-Atlantique, 49 Maine-et-Loire,
53 Mayenne, 72 Sarthe, 85 Vendée)
2 place de Bretagne
44932 Nantes cedex 9
tél. 02 51 72 84 08
fax 02 51 82 31 62
documentation.rp@carsat-pl.fr
www.carsat-pl.fr

CARSAT RHÔNE-ALPES

(01 Ain, 07 Ardèche, 26 Drôme, 38 Isère,
42 Loire, 69 Rhône, 73 Savoie,
74 Haute-Savoie)
26 rue d'Aubigny
69436 Lyon cedex 3
tél. 04 72 91 96 96
fax 04 72 91 97 09
preventionrp@carsat-ra.fr
www.carsat-ra.fr

CARSAT SUD-EST

(04 Alpes-de-Haute-Provence,
05 Hautes-Alpes, 06 Alpes-Maritimes,
13 Bouches-du-Rhône, 2A Corse-du-Sud,
2B Haute-Corse, 83 Var, 84 Vaucluse)
35 rue George
13386 Marseille cedex 5
tél. 04 91 85 85 36
fax 04 91 85 75 66
documentation.prevention@carsat-sudest.fr
www.carsat-sudest.fr

Services Prévention des CGSS

CGSS GUADELOUPE

Immeuble CGRR, Rue Paul-Lacavé, 97110 Pointe-à-Pitre
tél. 05 90 21 46 00 – fax 05 90 21 46 13
lina.palmont@cgss-guadeloupe.fr

CGSS GUYANE

Espace Turenne Radamonthe, route de Raban,
BP 7015, 97307 Cayenne cedex
tél. 05 94 29 83 04 – fax 05 94 29 83 01

CGSS LA RÉUNION

4 boulevard Doret, 97704 Saint-Denis Messag cedex 9
tél. 02 62 90 47 00 – fax 02 62 90 47 01
prevention@cgss-reunion.fr

CGSS MARTINIQUE

Quartier Place-d'Armes, 97210 Le Lamentin cedex 2
tél. 05 96 66 51 31 et 05 96 66 51 32 – fax 05 96 51 81 54
prevention972@cgss-martinique.fr
www.cgss-martinique.fr

COLLECTION DES AIDE-MÉMOIRE TECHNIQUES

Les différents procédés de soudage, de coupage ainsi que les techniques connexes, qui sont utilisés dans de très nombreux secteurs d'activité (métallurgie, nucléaire, agroalimentaire, électronique, automobile, etc.), émettent des fumées qui peuvent être inhalées par les opérateurs et les personnes travaillant à proximité. Ces fumées, composées d'un mélange de gaz et de poussières, peuvent selon leur composition, leur concentration et la durée d'exposition, présenter des effets néfastes pour la santé et être à l'origine de pathologies professionnelles.

Cette brochure propose de faire un point sur la composition, la formation, l'émission et la toxicité de fumées émises lors de travaux de soudage et des techniques connexes en fonction des procédés mis en œuvre et des matériaux de base et d'apport utilisés. Un bref rappel de la réglementation est également présenté.

