

Factsheet

Risques pour la santé dus au soudage¹

Michael Koller

La Suisse compte plus de 25 000 soudeurs et un grand nombre de travailleurs qui effectuent sporadiquement des opérations de soudage. Ces personnes sont exposées à divers risques pour leur santé: fumées, poussières, gaz, bruit, rayonnement, champs électromagnétiques, vibrations, températures élevées ou postures forcées. Le présent factsheet traite des atteintes possibles à la santé.

1. Vue d'ensemble des principaux procédés de soudage et de coupage

Le soudage (Schweissen en allemand, welding en anglais) et ses techniques connexes consistent à réunir, couper ou revêtir des matériaux métalliques ou thermoplastiques sous l'effet de la chaleur ou de la pression, avec ou sans matériaux d'apport (électrodes en fil ou barre, bra-sure, matériau de soudage auxiliaire pour le remplissage de la soudure, etc.). La chaleur est produite soit par un chalumeau à gaz combustible et à oxygène, soit par un courant électrique (arc électrique).

On distingue parmi les matériaux de base les matériaux ferreux et non ferreux. Le fer pur est rarement utilisé comme matériau de base, car il est trop ductile. Il n'est dur, et donc utilisable, que lorsqu'il est allié à un autre élément non ferreux, par exemple du carbone². Un alliage de fer et de carbone est appelé acier³. Les aciers peuvent contenir d'autres éléments d'alliage; on parle d'aciers faiblement alliés (moins de 5 % de composants d'alliage) et fortement alliés (plus de 5 %). Les alliages contiennent souvent les éléments suivants:

¹ Le présent factsheet se base sur la brochure de la Suva consacrée au soudage et rédigée par Meier J. R. et Hofer L. (médecine du travail Suva), 1998.

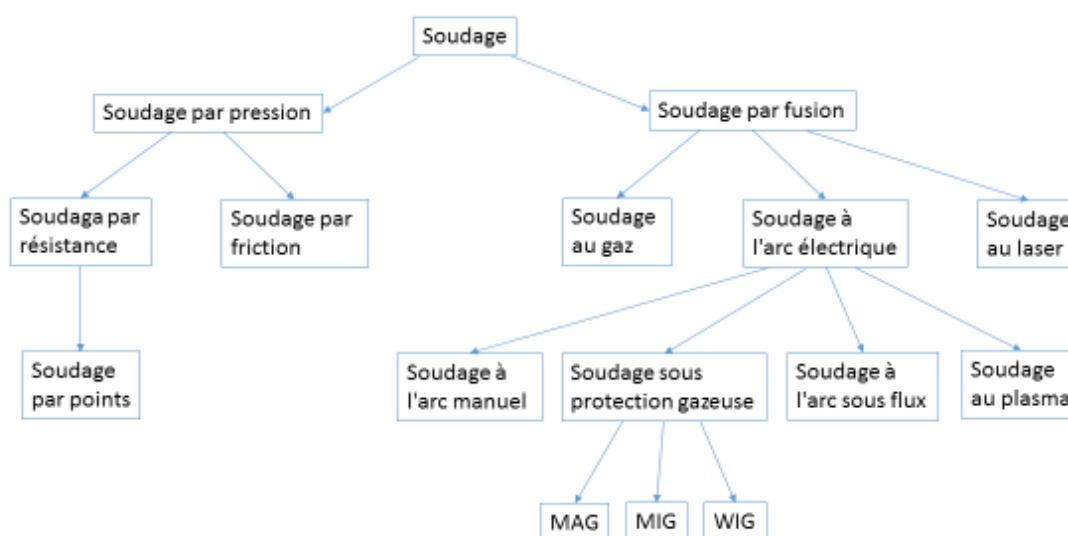
² On appelle alliage un mélange de nature métallique composé d'au moins deux éléments chimiques, dont l'un au moins est un métal (www.chemie.de/lexikon).

³ Selon la norme DIN EN 10020, l'acier est un matériau contenant plus de fer que tout autre élément en proportion de la masse et dont la teneur en carbone est généralement inférieure à 2 %. Si la teneur en carbone est plus élevée, on parle de fonte de fer. Si le niveau de pureté d'un acier est particulièrement élevé, on parle alors d'acier inoxydable. Dans la vie quotidienne, les aciers résistants à la corrosion sont également appelés acier inoxydable.

- *Chrome et nickel*: augmentent la résistance à la corrosion, la solidité, la dureté. L'acier inoxydable contient >12 % de chrome, l'acier résistant aux acides entre 12 et 18 % de chrome et de 8 à 12 % de nickel.
- *Manganèse*: augmente la résistance à la traction sans trop augmenter la dureté, augmente la résistance à l'usure du fait des contraintes mécaniques.
- *Cobalt*: augmente la dureté et la résistance à la chaleur.
- *Silicium*: augmente la dureté, la trempabilité, la solidité et l'élasticité (acier à ressorts).

Il existe en tout environ 140 procédés de soudage normalisés. La publication «Coupage et soudage» de la Suva (réf. 44053) présente en détail les divers procédés de soudage et de coupage ainsi que les mesures de protection correspondantes du point de vue technique et de l'hygiène du travail. Le présent factsheet n'en donne qu'un aperçu sommaire des différents modes de soudage.

Vue d'ensemble des différents modes de soudage



1.1. Soudage par pression

Dans le soudage par pression, les matériaux métalliques sont réunis sous pression. Les surfaces à souder sont au besoin chauffées localement et de manière limitée. Lorsque les deux pièces sont pressées l'une contre l'autre, la couche d'oxyde à leur surface est détruite et les deux métaux peuvent venir en contact l'un avec l'autre et se lier. La chaleur est produite soit par un courant électrique qui traverse la soudure (soudage par résistance électrique), soit par un frottement mécanique (soudage par friction). Aucun matériau d'apport n'est généralement nécessaire. Le soudage par pression produit peu d'émissions et provoque donc très rarement

des maladies professionnelles. La forme la plus connue de soudage par résistance électrique est le soudage par points.

1.2. Soudage par fusion

Dans le soudage par fusion, les parties des pièces métalliques à réunir sont chauffées jusqu'à la température de fusion, ce qui détruit la couche d'oxyde de surface. Les deux pièces métalliques peuvent ainsi se lier. On utilise le plus souvent un matériau d'apport de même type (matériau de soudage auxiliaire), qui fond et aide à remplir le joint de soudure. Le matériau d'apport contient souvent des adjuvants tels que des fondants, des agents scorifiants et des stabilisateurs d'arc. Les fondants éliminent la couche d'oxyde de surface par réaction chimique.

Selon la source de chaleur, on distingue trois types de soudage par fusion:

1.2.1. Soudage au gaz = soudage autogène

La source de chaleur est une flamme alimentée avec un mélange d'oxygène et de gaz combustible, le plus souvent de l'acétylène, mais aussi du gaz naturel, du propane, de l'hydrogène, etc. La température atteint jusqu'à 3000 °C. Le soudage au gaz est l'un des procédés les plus anciens, mais il est dangereux et coûteux et, de ce fait, il est remplacé par des procédés plus modernes.

1.2.2. Soudage à l'arc électrique

Dans ce mode de soudage, une décharge électrique est produite dans un gaz entre un métal d'apport servant d'électrode et la pièce pour apporter la chaleur. La température peut atteindre jusqu'à 5000 °C environ. L'électrode est détruite et les produits d'apport consommés, libérant des émissions potentiellement nocives, composées principalement d'oxydes de fer, de potassium, de silicium, de calcium, de chrome(VI), de magnésium, de baryum, de titane et de fluor. Le soudage à l'arc est le mode de soudage qui produit le plus d'émissions. Il existe différents types de soudage à l'arc:

Soudage à l'arc manuel (SAEE)

Le soudage à l'arc manuel utilise des électrodes en barre servant de matériau d'apport. Ces électrodes sont le plus souvent des électrodes dites enrobées, dont l'enveloppe contient différents additifs et substances auxiliaires. Lorsque l'arc brûle, la pointe de l'électrode fond et s'égoutte pour remplir le joint à souder. Une partie de la matière s'envole sous forme de fumée et le soudage à l'arc manuel est associé, de ce fait, à un fort taux d'émission de fumées.

Soudage sous protection gazeuse

Dans ce mode de soudage, un gaz protecteur autour de l'arc électrique empêche l'oxygène d'entrer en contact avec la soudure. L'enrobage des électrodes n'est ainsi plus nécessaire dans certains cas, ce qui diminue considérablement la production de fumée. Exemples:

- soudage avec électrode métallique sous protection gazeuse active (p. ex. $\text{CO}_2 \rightarrow \text{CO}$) (MAG),
- soudage avec électrode métallique sous protection gazeuse inerte (argon, hélium) (MIG),
- soudage avec électrode en tungstène sous gaz inerte (TIG) (l'électrode au tungstène ne fond pas).

Soudage à l'arc sous flux

Soudage au plasma

1.2.3. Soudage au laser

Dans le soudage au laser, la source d'énergie est un faisceau laser concentré par un système optique sur un point situé au niveau de la soudure, où il fait fondre le métal. Le diamètre de ce point n'est que de quelques dizaines de millimètre; la température augmente très rapidement jusqu'à la température de fusion de l'alliage. L'argon assure la protection contre l'oxydation.

1.3. Brasage

Dans le brasage, les pièces métalliques sont réunies à l'aide d'un alliage d'apport (brasure). La brasure peut être de l'étain, du zinc, de l'antimoine ou du plomb (interdit dans l'UE pour le brasage depuis 2006) pour le brasage tendre, de l'argent ou du cuivre pour le brasage fort (le cadmium est interdit dans la plupart des utilisations par l'ORRChim). Le brasage peut aussi utiliser des fondants (p. ex. colophane, chlorure de zinc) et (ou) des gaz protecteurs. La température de fusion de la brasure étant inférieure à celle des matériaux de base, ceux-ci ne fondent plus, mais sont seulement «humidifiés». Les fumées dégagées lors du brasage dépendent des fondants et des alliages utilisés.

1.4. Coupage

Lors du coupage thermique, la matière est portée en fusion et coupée par des jets de gaz. Il existe deux méthodes: le procédé autogène, par exemple l'oxycoupage, et le procédé à l'arc électrique, par exemple le coupage au laser ou au plasma. Dans le coupage thermique, la fumée provient principalement du matériau de base. Les particules sont plus grosses que

celles produites par le soudage et ne pénètrent que partiellement jusqu'aux alvéoles pulmonaires. La production de gaz, de fumée et de vapeurs est considérable.

Le tableau ci-dessous répertorie les principales substances dangereuses produites en fonction des différents procédés:

Procédé	Généralités	Matériau de base	Principaux composants
SAEE	Taux d'émissions nocives le plus élevé de tous les procédés de soudage 95 % de la fumée de soudage provient du matériau d'apport La fumée est composée d'oxydes (Fe, Mn, Na, K, Si, Ca, Cr, Ni, Mg, Ti) et de fluorures	Non allié/faiblement allié	Poussières alvéolaires
		Acier Cr-Ni	Poussières alvéolaires Composés de nickel (insolubles) Composés de Cr(VI)
		Fonte de fer	Poussières alvéolaires Composés de nickel (insolubles)
MAG	La fumée se compose surtout d'oxydes de fer (éventuellement de Ni, Mn, Cr) Gaz: monoxyde de carbone et éventuellement ozone	Non allié/faiblement allié	Poussières alvéolaires Manganèse Eventuellement CO
		Acier Cr-Ni	Poussières alvéolaires Composés de nickel (insolubles) Composés de Cr(VI)
MIG	Cr et Ni pour les matériaux d'apport fortement alliés	Non allié/faiblement allié	Poussières alvéolaires Eventuellement Cu
		Acier Cr-Ni, alliages de nickel	Poussières alvéolaires Composés de nickel (insolubles) Ozone
		Matériaux à base d'aluminium	Ozone Poussières alvéolaires
TIG	Emissions de fumée les plus faibles de tous les procédés de soudage	Non allié/faiblement allié Matériaux à base d'aluminium	Ozone (avec Al) Poussières alvéolaires
		Acier Cr-Ni, alliages de nickel	Ozone Composés de nickel (insolubles)
Plasma	Peu de fumée pendant le soudage au plasma (comparable au soudage TIG) Beaucoup de particules pendant le coupage Eventuellement formation de chromates et de NO _x	Non allié/faiblement allié	Poussières alvéolaires Eventuellement NO ₂
		Acier Cr-Ni, alliages de nickel	Poussières alvéolaires Composés de nickel (insolubles) NO ₂
		Matériaux à base d'aluminium	Ozone Poussières alvéolaires
Laser	Fumée comparable au soudage MAG pendant le soudage Grande quantité de poussières pendant le coupage Oxydes de cobalt en cas	Non allié/faiblement allié Acier zingué	Poussières alvéolaires Zinc
		Acier Cr-Ni, alliages de nickel	Poussières alvéolaires Composés de nickel

	d'alliages de cobalt Oxydes de cuivre et d'aluminium en présence de cuproaluminiums Attention au rayonnement!		(insolubles)
Résistance	Beaucoup de poussière avec les tôles enduites d'huiles ou revêtues (substances organiques)	Divers	Poussières alvéolaires Eventuellement Cu
Soudage au gaz Réchauffage au chalumeau	Peu de poussières (< 1 mg/s) Attention avec les matériaux cuivreux, les pièces zinguées ou cadmiées, les pièces peintes ou revêtues de plastique	Fer et acier	NO ₂
Oxycoupage	Formation de fumée et de poussière importante	Fer et acier	Poussières alvéolaires NO ₂
Brasage		Dépend du type de brasure et du fondant	Poussières alvéolaires NO ₂ (brasage à la flamme) Autres

Procédés de soudage et substances nocives émises

2. Principales substances nocives et problèmes de santé associés

Selon la méthode employée, le soudage produit différentes fumées, poussières, vapeurs et gaz, contenant diverses substances. Les fumées et les gaz comprennent au total plus de 40 substances chimiques.

Les **gaz⁴ et vapeurs⁵** proviennent des gaz de combustion et des gaz protecteurs, de l'air, des matériaux de revêtement ou d'impuretés. Exemples de substances nocives gazeuses:

- *Acétylène (C₂H₂)*: principalement utilisé pour le soudage autogène.
- *Ozone (O₃)*: se forme à partir de l'oxygène O₂ de l'air sous l'effet du rayonnement ultraviolet émis par la flamme de soudage; produit par les procédés de soudage dégageant peu de fumée (TIG).
- *Monoxyde de carbone (CO)*: produit par la réduction du CO₂ consommé comme gaz protecteur pendant le soudage MAG.
- *Oxydes d'azote (= gaz nitreux, NO_x)*: formés par l'oxydation de l'azote de l'air au contact d'une flamme nue.
- *Phosgène (COCl₂)*: libéré, sous l'action du rayonnement UV de la flamme de soudage, par les hydrocarbures chlorés utilisés comme solvants pour dégraisser les pièces.
- *Aldéhydes*

⁴On entend par gaz un état d'agrégation dans lequel les molécules se déplacent tout à fait librement et remplissent complètement et uniformément l'espace (source: chemie.de).

⁵On entend par vapeur un gaz qui est encore en contact avec la phase liquide ou solide de laquelle il est issu par évaporation ou sublimation (source: chemie.de).

Dans le cas des gaz, outre les atteintes directes possibles à la santé, il faut tenir compte aussi des risques d'incendie et d'explosion.

Les **poussières⁶ et fumées⁷** proviennent à 95 % du matériau d'apport (électrode, barres de soudure, brasure, poudre, matériau de soudage auxiliaire, fondant, etc.) et à 5 % du matériau de base. La fumée métallique se forme, d'une part, par la condensation et l'oxydation des métaux en phase vapeur et, d'autre part, par la combustion incomplète de matières, par exemple de matériaux de soudage auxiliaires ou d'un revêtement du matériau de base. Outre les oxydes métalliques, il y a également formation de fluorures et de chlorures métalliques.

L'exposition à la poussière dépend de divers facteurs spécifiques des procédés et des matériaux. C'est le soudage à l'arc manuel (SAEE) qui produit la plus grande quantité de particules parmi tous les procédés, et le soudage TIG et plasma la plus petite. Des mesures appropriées en hygiène du travail, par exemple des dispositifs d'aspiration, peuvent réduire fortement l'exposition aux poussières [Pesch: étude WELDOX].

Les particules produites lors du soudage, du coupage ou du brasage ont généralement un diamètre de 0.01 à 1 µm et peuvent ainsi pénétrer dans les alvéoles (**poussière alvéolaire: séparation de 50 % à 4 µm** [EN 481]). Les soudeurs sont plus fortement exposés que d'autres métiers à ces particules, et en particulier aux **particules ultrafines** de moins de 0,1 µm. Les particules sont généralement plus petites lors du soudage que lors du coupage, sauf dans le cas du coupage au laser qui produit principalement des particules ultrafines.

Une petite partie de la fumée de soudage, sous forme d'agglomérats⁸, compose la fraction inhalable de la poussière (**poussière inhalable: séparation de 50 % à 100 µm** [EN 481]). Les plus gros agglomérats de poussière se forment lors du coupage thermique ou de la projection thermique.

Le tableau 2 répertorie les principales substances dangereuses produites lors du soudage, avec leurs conséquences possibles pour la santé. Chacune de ces substances est ensuite abordée séparément.

⁶ Les poussières sont de fines particules solides qui peuvent rester longtemps en suspension dans l'air (source: chemie.de).

⁷ La fumée est de la poussière en suspension produite par des processus de combustion (source: chemie.de).

⁸ Agrégat = particule secondaire faite de particules primaires liées entre elles ou fusionnées, retenues par des forces puissantes telles que les forces covalentes ou les forces créées par le frittage ou des imbrications physiques complexes [source: nanopartikel.info/glossar]. Agglomérat = particule secondaire composée de particules primaires (p. ex. d'agrégats) faiblement liées, retenues par des forces faibles telles que les forces de van der Waals ou des imbrications physiques simples [source: nanopartikel.info/glossar].

Substance ou son oxyde	Principaux troubles de santé
Aluminium	Aluminose
Plomb	Effets toxiques sur le sang, le système nerveux, les reins, l'appareil digestif et l'appareil reproducteur
Cadmium	Atteinte pulmonaire et rénale, pneumopathie toxique (cancer du poumon?)
Chrome(III)	Irritation des muqueuses
Chrome(VI)	Tumeurs des fosses nasales et des sinus, cancer du poumon, sensibilisation (dermite)
Cobalt	Sensibilisation (asthme, eczéma)
Isocyanates	Asthme
Cuivre	Fièvre des métaux, irritation des voies respiratoires
Fluorures	Irritation (fluorose, atteinte rénale)
Fer	Sidérose (poumon des fondeurs), sidérofibrose
Monoxyde de carbone	Symptômes neurologiques centraux, asphyxie, symptômes cardiovasculaires
Magnésium	Fièvre des métaux
Manganèse	Parkinsonisme (manganisme), fièvre des métaux, bronchite
Molybdène	Irritation des voies respiratoires
Nickel	Sensibilisation, cancers des voies respiratoires
Ozone	Irritation des voies respiratoires
Phosgène	Irritation des voies respiratoires, œdème pulmonaire
Oxydes d'azote (= gaz nitreux)	Irritation des voies respiratoires, bronchiolite, œdème pulmonaire
Vanadium	Irritation des voies respiratoires
Zinc	Fièvre des métaux, neurotoxicité
Etain	Stannose, neurotoxicité

Principales substances dangereuses (et leurs oxydes) et problèmes de santé provoqués par ces dernières ou leurs composés lors du soudage

2.1. Aluminium

Les oxydes d'aluminium se forment lors de la mise en œuvre de matériaux de base ou d'apport contenant de l'aluminium. Après des mois ou des années d'exposition à des fumées de soudage contenant de l'aluminium, on peut voir se constituer une aluminose (pneumoconiose) sans atteinte des ganglions lymphatiques hilaires ni formation de granulomes, affectant principalement les champs supérieurs et moyens des poumons. Un scanner à haute résolution est nécessaire pour le diagnostic précoce de l'aluminose, car la radiographie conventionnelle ne décèle que les lésions avancées.

Dans les expérimentations animales, l'aluminium s'avère neurotoxique et provoque la formation d'enchevêtrements neurofibrillaires dans les neurones (agrégats de protéine tau), tels qu'on les observe aussi dans la maladie d'Alzheimer. Il n'existe cependant aucune preuve que l'aluminium joue un rôle causal dans l'apparition de cette forme de démence [Klotz]. En revanche, il semble qu'il existe bien un lien entre une concentration urinaire d'aluminium trop élevée et des troubles cognitifs [Klotz].

La demi-vie de l'aluminium dans l'organisme pouvant être de plusieurs mois voire plusieurs années, le meilleur moyen d'évaluer l'exposition d'un travailleur est de contrôler la concentration d'aluminium dans ses urines dans le cadre d'un monitoring biologique.

2.2. Plomb

On utilisait autrefois des peintures et vernis contenant du plomb; ces produits sont aujourd'hui interdits par l'ORRChim. En revanche, on utilise encore parfois des brasures au plomb.

L'inhalation de fumées contenant du plomb provoque des troubles de différents systèmes d'organes. Si le système nerveux central est affecté, les symptômes peuvent prendre la forme d'une neurasthénie avec fatigue, épuisement rapide, problèmes de concentration, etc. Celle-ci ne survient toutefois qu'après une exposition prolongée et à des concentrations élevées, dans des conditions que l'on ne rencontre pratiquement plus aujourd'hui, en particulier, lors du soudage. Si l'exposition se prolonge encore, les symptômes peuvent s'étendre au système nerveux périphérique: c'est le cas, par exemple, de la «main tombante» induite par le plomb. Les effets toxiques comprennent aussi des anémies avec punctuations basophiles des érythrocytes, des troubles du métabolisme de la porphyrine avec élévation de l'acide delta-aminolévulique et de la coproporphyrine dans les urines, ou des troubles fonctionnels des tubules rénaux (avec microprotéinurie) et de l'appareil reproducteur [Publication Suva sur le plomb]. Certains indices suggèrent que le plomb pourrait être cancérigène, mais la puissance des études en question est toutefois insuffisante pour que l'on puisse définitivement classer le plomb parmi les cancérigènes (C2 dans la classification de la Suva).

L'exposition au plomb lors du soudage est généralement estimée à l'aide de la plombémie, en sachant qu'il faut viser pour les femmes en âge d'enfanter un taux plus bas que pour les

hommes et pour les femmes plus âgées. Le dosage de l'acide delta-aminolévulique dans les urines n'est plus utilisé que pour les ouvriers très exposés, par exemple ceux qui appliquent des traitements anticorrosion.

2.3. Cadmium

Certaines brasures, peintures et vernis contenaient autrefois du cadmium. L'exposition à ce métal ne se produit plus aujourd'hui que lors du soudage et de la découpe de matériaux cadmiés.

Sa toxicité dépend du composé en présence: le chlorure, l'oxyde et le carbonate de cadmium sont plus toxiques que le sulfure. L'exposition à des fumées de soudage contenant du cadmium peut provoquer une fièvre des métaux et des inflammations pulmonaires d'évolution très sévère, avec œdème pulmonaire. L'exposition prolongée au cadmium peut provoquer des rhinites atrophiques et des pneumopathies obstructives. Le cadmium peut également compromettre la fonction tubulaire, mais n'entraîne pas d'insuffisance rénale chronique (néphropathie chronique) [Byber].

Le cadmium et ses composés entrent dans la catégorie de cancérogènes C1_B[#] selon la liste suisse des valeurs limites d'exposition aux postes de travail, car ses composés se sont avérés cancérogènes lors d'essais sur l'animal. Chez l'homme, le cadmium est soupçonné d'augmenter le risque de cancer du poumon et pourrait être associé à des cancers du rein et du pancréas. La notation «#» indique que l'effet cancérogène a une valeur seuil plus élevée que la VME.

Le calcium est absorbé à travers la peau et un monitoring biologique, avec dosage du cadmium dans les urines, devrait être envisagé.

2.4. Chrome

Du point de vue de la médecine du travail, ce sont les composés trivalents et hexavalents du chrome, Cr(III) et Cr(VI), qui sont préoccupants. La forme métallique est insoluble et n'a pas d'activité biologique.

La fumée contient des **composés de Cr(III)** lors du soudage MAG avec des fils fortement alliés. Ces composés sont corrosifs et peuvent causer des ulcérations chroniques de la cloison nasale et de la peau. Ils peuvent également provoquer des réactions allergiques cutanées de type IV ou un asthme (sauf l'oxyde de Cr(III) et les composés de Cr(III) peu solubles).

Les principaux **composés de Cr(VI)** qui se présentent lors du soudage sont le trioxyde de chrome CrO₃ et les chromates CrO₄²⁻. Ces derniers se forment surtout lors du soudage à l'arc manuel avec des électrodes en barre enrobées en acier chrome-nickel fortement allié, ainsi que lors du soudage sous protection gazeuse avec des fils fourrés fortement alliés [DGUV]. Lors du découpage plasma sous air comprimé, du découpage au laser d'acier chrome-nickel

fortement allié et de projection thermique avec des additifs de projection fortement chromés, il se forme surtout du trioxyde de chrome.

Les composés de Cr(VI) sont sensibilisants et pénètrent à travers la peau (à l'exception des chromates de baryum et de chrome). Comme ces composés peuvent être absorbés par la peau et dans l'appareil digestif, il est conseillé de mettre en place un monitoring biologique en plus des mesures de la concentration dans l'air.

Les composés de Cr(VI) sont rangés parmi les cancérrogènes de classe C1_A dans la liste suisse des valeurs limites d'exposition aux postes de travail. Ils augmentent le risque de cancer du poumon, et probablement aussi des fosses nasales et des sinus. Ce risque concerne en particulier les ouvriers des ateliers de galvanisation et de chromage ainsi que de production de chromates et de pigments aux chromates. S'il est incontestable que les soudeurs présentent un risque accru de cancer du poumon, le rôle des composés de Cr(VI) dans cette augmentation reste incertain [Brüning]. En ce qui concerne la reconnaissance du cancer du poumon comme maladie professionnelle des soudeurs, Brüning et al. recommandent de se baser sur une dose minimale cumulée d'environ 500 µg/m³ x années.

2.5. Cobalt

Le cobalt est utilisé comme liant dans la matrice des métaux durs⁹. La fabrication et l'usinage des métaux durs peuvent occasionner des œdèmes pulmonaires, des alvéolites fibrosantes et fibroses pulmonaires, mais pas leur soudage. Le cobalt et ses composés ont un effet sensibilisant et peuvent provoquer eczéma de contact, urticaire et asthme. Le cobalt provoque des cancers chez les rongeurs et il figure donc parmi les cancérrogènes probables chez l'homme (C1_B) dans la liste suisse des valeurs limites d'exposition aux postes de travail, bien qu'aucun effet cancérogène n'ait été démontré chez l'homme à ce jour. En outre, le cobalt a probablement un effet reprotoxique (R1_{BF}). Les composés de cobalt solubles, et probablement aussi le cobalt métallique, peuvent pénétrer à travers la peau: un monitoring biologique est donc à conseiller en plus de la surveillance de l'air.

⁹Les frites de métaux durs se composent de carbures frittés (C_xM_y, où C = carbone et M = tungstène, titane, tantale, niobium, molybdène, chrome ou vanadium). La matrice est formée de cobalt, plus rarement de nickel et de fer. Outre les frites, les métaux durs se présentent sous d'autres formes telles que les alliages d'apport au carbure de tungstène, les poudres frittées par projection, la fonte de carbure.

2.6. Fer

La fumée de fer, issue du matériau d'apport comme du matériau de base [BGI 593], peut irriter les voies respiratoires. Une exposition prolongée et intensive peut conduire à une sidérose ou une sidérofibrose pulmonaire. La **sidérose** pulmonaire est également appelée «poumon des soudeurs». Il s'agit d'une accumulation des particules de fer inhalées, qui se déposent dans les tissus interstitiels des poumons et les macrophages, le plus souvent sans provoquer de réaction. On retrouve principalement ces dépôts de fer autour des bronches, des vaisseaux pulmonaires et des ganglions lymphatiques bronchopulmonaires. A la radiographie, ces dépôts apparaissent comme des opacités disséminées et réticulées ou des ombres ponctuelles ou nodulaires («tatouage pulmonaire»). Les altérations visibles au scanner ressemblent à celles que l'on observe chez les fumeurs. Elles semblent associées à une forte exposition aux fumées du soudage et deviennent visibles, au plus tôt, au bout d'environ cinq ans d'exposition, tandis que leur fréquence augmente avec les années, principalement si l'activité se prolonge [McMillan].

Si le dépôt d'oxyde de fer s'accompagne d'une fibrose, on parle de **sidérofibrose**. On observe parfois aussi une inflammation associée. Selon l'importance des dépôts, de la fibrose et de l'inflammation, la sidérofibrose est classée en stades I à III selon Müller et Verhoff [Müller]. Les remaniements fibreux sont surtout fréquents en association avec le soudage à l'arc manuel (SAEE), qui est le procédé produisant les plus fortes émissions. On parle dans ce cas de «poumon des soudeurs à l'arc». La présence d'ozone (pour le soudage des matériaux à base d'aluminium et des aciers inoxydables) ou d'oxydes d'azote (pour le soudage à la flamme) amplifie l'effet fibrosant de la fumée de soudage.

En règle générale, les sidéroses pures n'entraînent pas de diminution de la fonction pulmonaire et ne sont pas ou très peu évolutives. On ne les considère donc pas comme une maladie en tant que telle. En revanche, compte tenu des antécédents professionnels et des résultats cliniques, une sidérofibrose chez un sujet ayant travaillé pendant plusieurs années comme soudeur dans les conditions favorisant l'apparition de la maladie (situations confinées dans des caves, tunnels, conteneurs, réservoirs, etc.) est reconnue comme maladie professionnelle.

2.7. Fluor

Les fluorures se forment surtout dans la fumée de soudage dégagée par les électrodes basiques à la chaux. Ils peuvent irriter les yeux et les voies respiratoires. Il faut plusieurs années d'exposition, à des concentrations très supérieures à la valeur limite qui ne se produisent pas lors du soudage, pour voir apparaître une fluorose ou un œdème pulmonaire. Les fluorures pénètrent à travers la peau et il existe un monitoring biologique pour les composés fluorés inorganiques.

2.8. Cuivre

Les effets toxiques les plus fréquents du cuivre sont des troubles gastro-intestinaux et des lésions hépatiques faisant suite à l'ingestion de cuivre, par exemple avec des boissons contenues dans des récipients libérant du cuivre.

Dans le cadre du soudage, on observe une irritation des voies respiratoires ou une fièvre des métaux après l'exposition aux fumées de cuivre. Ces troubles prennent la forme de fièvre, de céphalées, de sécheresse de la bouche et de la gorge avec un goût métallique, de nausées et d'essoufflement. La fièvre des métaux débute quelques heures après l'exposition et dure un ou deux jours. Elle est décrite plus précisément dans la section 3.

2.9. Manganèse

Le soudage à l'arc avec des matériaux de soudage auxiliaires contenant du manganèse libère des oxydes de manganèse.

Absorbés par inhalation, le manganèse et ses composés inorganiques sont toxiques pour les poumons et le système nerveux central.

Les effets respiratoires aigus sont des réactions inflammatoires avec bronchite, pneumopathie et rarement des métaux. Les effets (sub)aigus sur le système nerveux central sont des insomnies, une instabilité émotionnelle, des problèmes de mémoire, des maux de tête ou des crampes musculaires.

En cas d'exposition chronique, le manganèse s'accumule dans le tronc cérébral et les ganglions de la base. Il perturbe le système de transmission dopaminergique et provoque des symptômes parkinsoniens (**manganisme**), sans aller toutefois, en règle générale, jusqu'à un syndrome parkinsonien constitué [Racette]. L'importance du parkinsonisme est évaluée par exemple, dans le cadre des études, à l'aide du «test de tapping», qui consiste à tapoter le plus vite possible son pouce avec son index. Comme le fer emprunte, en partie, les mêmes voies de transport que le manganèse (transferrine), un taux de fer suffisamment élevé dans le sang pourrait avoir un effet protecteur.

En cas d'exposition suspectée au manganèse, la détermination de la concentration de manganèse dans le sang [Plitzko] est l'analyse la plus importante dans le cadre du monitoring biologique. L'étude de Heidelberg sur le manganèse [Lischka] a montré qu'aucun effet neurotoxique n'était à craindre en dessous d'une VBT de 20 µg/l.

2.10. Nickel

Des oxydes de nickel se forment principalement lors du soudage avec des matériaux de soudage auxiliaires contenant du nickel.

L'effet toxique le plus fréquemment provoqué par le nickel est la dermatite de contact. Il s'agit d'une sensibilisation retardée (allergie de type IV) qui peut survenir après un contact prolon-

gé avec le métal. Cette sensibilisation affecte 10 à 20 % de la population, et les femmes plus souvent que les hommes.

Dans le cas du soudage toutefois, ce n'est pas le contact avec la peau, mais l'inhalation du métal qui est la plus préoccupante. Un asthme bronchique exogène peut se développer. Le nickel carbonyle $\text{Ni}(\text{CO})_4$, produit par la réaction du nickel avec le monoxyde de carbone, est particulièrement toxique par cette voie. Son inhalation peut provoquer irritations, céphalées, nausées, cyanose, asthénie, fièvre et pneumopathie.

L'exposition aux composés de nickel a été associée à une incidence accrue de cancers des fosses nasales, des sinus et d'appareil respiratoire (y compris le larynx). Les composés de nickel sont classés parmi les cancérrogènes de classe C1_A dans la liste suisse des valeurs limites d'exposition aux postes de travail, ce qui signifie que leur effet cancérogène chez l'homme est suffisamment démontré par les études. Toutefois, chez l'homme, la valeur probante des données n'est suffisante, selon le CIRC, que pour le sulfate, les sulfures et les oxydes de nickel. L'existence d'un seuil de concentration fait débat. Le nickel métal a été classé dans la catégorie de cancérrogènes C2, ce qui signifie qu'il existe bien des indices d'effet cancérogène, mais que les données disponibles sont insuffisantes pour le classer parmi les cancérrogènes.

L'exposition au nickel est estimée, de préférence, au moyen d'un monitoring biologique (concentration urinaire).

2.11. Zinc

L'oxyde de zinc se forme, par exemple, lors du soudage de métaux galvanisés ou lors du braçage. Les oxydes de zinc sont la cause la plus fréquente de la fièvre des métaux, qui est décrite en détail ci-après. Le zinc peut provoquer des lésions cutanées acnéiformes. Au niveau des tissus cérébraux, l'excès de zinc endommage les neurones. En cas d'ingestion, le zinc provoque des troubles gastro-intestinaux (diarrhées) ou des lésions du pancréas (attaque des cellules bêta ou fibrose). Par ailleurs, le zinc inhibe l'absorption du cuivre au niveau intestinal et peut provoquer des carences en cuivre.

2.12. Etain

L'étain et ses composés organiques entrent dans la composition de certaines brasures et sont utilisés pour la galvanisation. Ils sont relativement peu toxiques. Leur inhalation chronique peut toutefois entraîner une pneumoconiose bénigne, appelée stannose.

Quelques composés organiques d'étain (triéthyl- et triméthylétain) sont neurotoxiques et provoquent des encéphalopathies et des œdèmes cérébraux à concentration élevée. Le tributylétain peut causer des irritations ou brûlures cutanées.

2.13. Gaz

Monoxyde de carbone

Le monoxyde de carbone est utilisé comme gaz actif dans le soudage MAG au CO₂ et se forme également lors de la combustion incomplète des gaz combustibles, des fondants et des revêtements.

Il provoque céphalées, vertiges et lésions du myocarde. Inodore, il peut s'accumuler dans les espaces clos jusqu'à provoquer la mort par asphyxie. La concentration de CO-Hb (carboxyhémoglobine) dans le sang ne doit pas dépasser 5 % de l'hémoglobine totale.

Ozone

L'ozone, O₃, se forme à partir de l'oxygène, O₂, sous l'action des ultraviolets émis par l'arc électrique, notamment dans le soudage TIG qui produit peu de fumée (dans la fumée, l'ozone redevient de l'oxygène), le soudage MIG et le soudage plasma d'aciers réfléchissants contenant de l'aluminium, du chrome ou du nickel.

Il provoque une sécheresse des muqueuses, des céphalées, mais aussi des inflammations des voies respiratoires inférieures entraînant hyperréactivité bronchique, asthme, œdème pulmonaire, voire parfois fibrose pulmonaire. On lui prête un hypothétique effet cancérigène, mais les données ne sont pas suffisamment probantes pour le classer avec certitude (catégorie C2).

Phosgène

Le phosgène (COCl₂, chlorure de carbonyle) se forme, sous l'effet de la chaleur et des UV, à partir des hydrocarbures chlorés utilisés comme solvants pour nettoyer et dégraisser les métaux, par exemple du perchloréthylène. Lipophile, il parvient jusqu'aux bronches où il produit d'importants effets toxiques et peut provoquer un œdème pulmonaire après un temps de latence qui peut aller de quelques heures à trois jours. Plus haut dans l'appareil respiratoire, il provoque tout au plus une légère irritation à basse concentration.

Oxydes d'azote (gaz nitreux, NO_x)

Les oxydes d'azote se forment par oxydation de l'azote de l'air sur les surfaces de contact de la flamme de gaz ou de l'arc électrique. Au-dessus de 1000 °C, c'est d'abord du monoxyde d'azote qui se forme, pour s'oxyder en dioxyde d'azote NO₂, plus toxique, à température ambiante.

A des concentrations élevées, le NO provoque en quelques minutes vertiges, étourdissements voire perte de connaissance, détresse respiratoire, cyanose, nausées et vomissements.

En pratique, le tableau d'intoxication est surtout marqué par le NO₂, qui produit son effet toxique dans les bronches et les alvéoles pulmonaires. Comme l'ozone, le dioxyde d'azote peut provoquer une sécheresse des muqueuses, des céphalées, un œdème ou une fibrose pulmonaire.

L'atteinte due aux gaz nitreux est un paramètre important dans les maladies professionnelles des soudeurs acquises par inhalation. Elle menace en particulier les soudeurs qui travaillent avec des gaz combustibles dans des locaux mal ventilés (découpe au chalumeau dans des caves, chauffage et soudage à la flamme à l'intérieur de cuves).

2.14. Autres

Le soudage peut libérer d'autres substances nocives : baryum, vanadium, aldéhydes dégagés par les produits de revêtement, de graissage et de dégraissage, mais aussi isocyanates issus de la dégradation thermique des vernis au polyuréthane. Le sablage arrache à la surface des pièces de la rouille, des dépôts, de la peinture et autres impuretés. Selon la méthode employée, ce travail peut entraîner une exposition aux silicates, également responsables d'inflammations et de fibroses du parenchyme pulmonaire.

3. Effets toxiques par systèmes d'organes et tableaux pathologiques

3.1. Yeux

Les arcs électriques et les flammes du soudage produisent des rayonnements lumineux dans la plage allant de l'infrarouge à l'ultraviolet. Leur intensité dépend, entre autres, du procédé, du gaz protecteur et du matériau travaillé. Ils peuvent endommager la cornée en l'absence de mesures de protection ou par réflexion. Ce risque ne concerne pas seulement le soudeur, mais aussi les personnes se trouvant à proximité. Le soudage par points, qui est une forme de soudage par résistance, produit lui aussi un arc électrique qui peut provoquer des lésions oculaires. Les ultraviolets peuvent provoquer une inflammation de la conjonctive et de la cornée (kératoconjunctivite photoélectrique). Ce «**coup d'arc**» survient quelques heures après le travail et disparaît sans séquelles, en l'absence d'exposition, un à deux jours plus tard. Les données concernant la fréquence accrue des mélanomes de la choroïde chez les soudeurs sont trop hétérogènes pour que ces tumeurs soient reconnues comme une maladie professionnelle en Allemagne [Hiller].

Le rayonnement infrarouge produit par le soudage peut provoquer une **cataracte** et des lésions induites par la chaleur. Cette cataracte peut être évitée efficacement avec de bons EPI [Michaelsen Slagor].

Des lésions oculaires peuvent également survenir en cas d'exposition directe, sans protection, à des gaz, fumées, étincelles et autres qui peuvent pénétrer dans les yeux et provoquer **irritations et brûlures**.

Les yeux doivent être protégés aussi bien des ultraviolets que du rayonnement dans le spectre de la lumière visible et des infrarouges (casque ou masque de soudage).

3.2. Appareil respiratoire

D'après une étude du Berufsgenossenschaftliches Forschungsinstitut für Arbeitsmedizin de Bochum, il est rarement possible d'établir une relation de cause à effet générale entre le soudage et une maladie respiratoire [Wieners]. Une évaluation au cas par cas est nécessaire, en tenant compte des antécédents du sujet, de l'examen clinique, des conditions au poste de travail et d'autres facteurs. L'exposition aux fumées de soudage provoque parfois une diminution des paramètres pulmonaires, limitée dans le temps, pendant les journées de travail. Ce déficit semble toutefois se corriger pendant les jours sans exposition [Antonini, Beckett].

Irritations

L'exposition à la fumée et aux gaz de soudage (p. ex. ozone, oxydes d'azote, phosgène, oxydes de métaux alcalins et alcalinoterreux, cadmium, cuivre, pentoxyde de vanadium, acétaldéhyde, acroléine, cyanure d'hydrogène, résines époxy, formaldéhyde, isocyanates, anhydride phtalique) peut entraîner des irritations des voies respiratoires hautes et basses, pouvant aller jusqu'à un œdème pulmonaire.

Dans le haut appareil respiratoire, l'irritation de la muqueuse nasale se manifeste par une sensation de brûlure avec écoulement fluide, gonflement et rougeur des muqueuses, parfois hyposmie. L'exposition au cadmium peut provoquer une rhinite, l'exposition au pentoxyde de vanadium une rhinite et une hyposmie, mais aussi une coloration vert noirâtre de la langue, le mercure et le plomb provoquent des stomatites et des gingivites.

Œdème pulmonaire

Les œdèmes pulmonaires sont devenus rares, car ils surviennent en cas d'exposition à concentration élevée (grande flamme). Les œdèmes toxiques d'origine chimique sont caractérisés par un intervalle de 2 à 72 heures durant lequel les symptômes sont légers (irritations, toux, abattement, fièvre [DD: fièvre des métaux], légère dyspnée). Après cette première phase, l'aggravation est spectaculaire et les alvéoles se remplissent rapidement de transsudat. Quand l'œdème a régressé, il est parfois suivi d'une bronchiolite oblitérante ou d'une fibrose des tissus pulmonaires; il se résout cependant le plus souvent sans séquelles. Les travailleurs les plus exposés à l'œdème pulmonaire sont, ou étaient, ceux qui travaillaient avec de l'acier galvanisé et inoxydable (donc contenant du chrome), du cadmium, du cobalt, du tétr oxyde d'osmium, de la phosphine ou des gaz lipophiles tels que le dioxyde d'azote ou le phosgène. Le cadmium peut provoquer des irritations particulièrement sévères. L'ozone, l'acroléine et le pentoxyde de vanadium provoquent des lésions toxiques des voies respiratoires hautes et basses.

Bronchite chronique et BPCO

Le risque de **bronchite chronique**¹⁰ et d'hyperréactivité bronchique est particulièrement élevé chez les soudeurs travaillant l'acier galvanisé ou inoxydable. Des études de grande ampleur (ECRHS II ou RHINE) font apparaître des risques relatifs de 1,4 à 2,1, selon les procédés de soudage et l'importance de l'exposition [Lillienberg, Holm]. En outre, la fréquence des bronchites chroniques semble plus élevée parmi les soudeurs qui fument que parmi les fumeurs qui ne soudent pas [Tarlo].

On sait que certains métaux, tels que le cadmium, peuvent provoquer des pneumopathies obstructives. Aucun lien de cause à effet entre l'exposition à la fumée de soudage en général et l'apparition d'une **BPCO** n'a cependant pu être démontré de façon concluante. Une nouvelle étude d'ensemble et la méta-analyse d'études longitudinales réalisées auprès de soudeurs ont montré que ceux-ci présentaient bien une plus forte perte annuelle de la fonction pulmonaire que les ouvriers non exposés à la fumée de soudage, mais que cet effet n'était pas statistiquement significatif, et surtout qu'il était plus marqué chez les fumeurs [Szram]. Dans une étude de cohorte publiée la même année en France, l'exposition à la fumée de soudage des travailleurs manuels a été estimée au moyen d'une grille d'exposition. La fonction pulmonaire initiale de ces ouvriers exposés professionnellement à la fumée de soudage était inférieure à celle des travailleurs non exposés. La vitesse de diminution de la fonction pulmonaire était supérieure chez les ouvriers exposés, sans toutefois que cela ne soit significatif ici encore. Cette étude montre toutefois une relation entre exposition et effet en ce qui concerne la baisse du VEMS chez les non-fumeurs [Thaon]. Dans certains cas, on peut établir un lien de cause à effet entre la BPCO et l'activité de soudeur si le sujet a travaillé pendant plusieurs années, dans de mauvaises conditions de ventilation, avec des électrodes en barre enrobées (surtout basiques et contenant des fluorures) ou s'il a été employé exclusivement au soudage sous gaz protecteur de matériaux de base réfléchissants (p. ex. aluminium, acier inoxydable) avec émissions élevées d'ozone pendant de longues années. On notera que le tabac constitue le facteur de risque de BPCO le plus important: en moyenne, le risque relatif est de 2,9 pour les hommes fumeurs selon la méta-analyse de Forey [Forey]. De ce fait, il est difficile, voire impossible de faire la part entre l'exposition à la fumée de soudage et à la fumée de cigarette dans la constitution d'une BPCO chez un fumeur. La BPCO est généralement sans gravité chez les sujets qui n'ont jamais fumé de toute leur vie.

Asthme

En ce qui concerne l'asthme chez les soudeurs, les études donnent des résultats contrastés. On ne s'en étonnera pas, étant donné que l'asthme obéit à différents mécanismes et déclencheurs. Plusieurs études semblent néanmoins établir une relation [Bakerly, Banga, El-Zein],

¹⁰ La bronchite chronique est un diagnostic clinique, déterminé par la présence d'une toux productive pendant quatre jours ou plus par semaine, sur trois mois ou plus par an et au moins deux années consécutives. La cigarette est le déclencheur le plus fréquent de la bronchite chronique.

et une revue récente classe la fumée de soudage au plus haut niveau de preuve en tant que facteur causal d'asthme ou de BPCO [Baur]. En revanche, l'étude ECRHS II conclut que le soudage n'est pas associé à une prévalence accrue de symptômes asthmatiques [Lilienberg]. Toutefois, cette étude basée sur la population ne portait pas seulement sur les soudeurs, mais aussi sur des travailleurs dont l'occupation principale n'était pas le soudage. Il n'en demeure pas moins qu'un asthme peut se constituer en cas de sensibilité spécifique à une substance (p. ex. Cr(VI), nickel, isocyanates) contenue dans la fumée de soudage, sous la forme d'un «syndrome réactionnel de dysfonction des voies respiratoires» en cas de très forte exposition de courte durée, et peut-être aussi sous la forme d'un asthme irritatif en cas d'exposition répétée, mais à des concentrations modérées. Si le sujet considéré présente effectivement un asthme, il faut rechercher en particulier une éventuelle sensibilisation au nickel ou au chrome. Au besoin, un test de provocation bronchique spécifique ou une série de mesures du débit expiratoire de pointe sera envisagé.

Pneumoconioses

Des pneumoconioses peuvent se constituer après une exposition prolongée et intensive à la fumée de soudage. La forme la plus fréquente est la **sidérose** (poumon des soudeurs) (voir la description détaillée à la section «Fer»). Le poumon des soudeurs est une accumulation des particules de fer qui se déposent dans les tissus interstitiels et les macrophages, sans provoquer de réaction («tatouage pulmonaire») ni d'altérations de la fonction pulmonaire, ou seulement minimales. On n'observe de signes d'inflammation et de dégradation de la fonction pulmonaire que dans les formes graves de sidérofibrose. Les dépôts d'étain provoquent une **stannose**, la pneumoconiose due à l'aluminium est appelée **aluminose** et il existe aussi des fibroses pulmonaires résultant de l'exposition au baryum et à l'antimoine.

Inflammations et infections

Les oxydes d'azote et de calcium, le manganèse, le nickel carbonyle peuvent également attaquer le poumon et, si l'exposition est intensive, provoquer une **pneumopathie**¹¹ et un œdème pulmonaire [p. ex. Erkinjuntti ou Wieners].

L'inhalation de fumée de soudage semble avoir un effet sur le système immunitaire. Elle semble avoir un effet péjoratif sur la gravité et l'évolution des **infections** des voies respiratoires hautes et basses [Zeidler]. Les soudeurs consultent plus fréquemment un médecin pour des infections respiratoires [Marongiou]. Des études cas-témoins réalisées en Angleterre suggèrent en outre que les soudeurs ont davantage de risques de contracter des inflammations pulmonaires graves [Palmer, Wong]. Le risque ne semble cependant accru que pour les travailleurs dont l'occupation actuelle est le soudage, et diminue à nouveau lorsque l'activité de soudage cesse.

Cancer du poumon

Le taux de cancers du poumon est légèrement augmenté parmi les soudeurs et atteint des valeurs relatives de 1,2 à 1,4 dans des études récentes [Ambroise, Kendzia, MacLeod]. L'existence d'une inflammation chronique du parenchyme pulmonaire et la production de radicaux libres pourraient expliquer le risque accru de cancers [Tarlo], dont une partie pourrait cependant être liée aussi à l'usage du tabac et parfois à une coexposition à l'amiante [MacLeod]. Dans l'ensemble, malgré différentes études faisant apparaître un risque accru de cancer, le CIRC a seulement classé le soudage parmi les «cancérogènes potentiels» (classe 2B du CIRC = classe 2 de la Suva).

Ce risque accru pourrait être lié, entre autres, aux composés de **chrome(VI)** et aux **sels de nickel** cancérogènes présents dans la fumée, bien que cette étude ne le démontre pas directement et bien que le risque de cancer du poumon soit également accru lors du soudage d'aciers non alliés. Les composés de chrome(VI) et nickel, contenues dans la fumée de soudage, sont des cancérogènes de classe C1_A selon la Suva, qui peuvent augmenter le risque de cancer des fosses nasales, des sinus ou du bas appareil respiratoire [Balindt, Grimsrud, IIW, Moulin]. Le taux de mortalité normalisé (SMR) par cancer associé aux composés de chrome(VI) est de 1,4 ou de 1,1 après correction tenant compte de l'usage du tabac [Cole]. Il n'existe pas de rapport de risque connu pour les sels de nickel.

Le rôle cancérogène du **cadmium**, également présent dans la fumée de soudage, n'est pas définitivement élucidé. Le cadmium est classé parmi les cancérogènes C1_B[#] dans la liste suisse des valeurs limites aux postes de travail (le «#» signifie qu'il existe une valeur seuil de l'effet cancérogène plus élevée que la VME).

Le nickel et les composés de chrome(VI) étant inclus dans la liste prévue à l'art. 9 al. 1 de la LAA, il faut que la contribution de l'un de ces deux métaux à l'apparition d'un cancer du pou-

¹¹ Pneumopathie = inflammation pulmonaire causée par des agents chimiques ou physiques
Pneumonie = inflammation pulmonaire d'origine microbienne

mon soit d'au moins 50 % de toutes les causes impliquées, en tenant compte aussi du tabac et de l'amiante (voir la section «Bases légales de la reconnaissance des maladies professionnelles»). Cela correspond à un risque relatif de 2, qui n'est pas atteint dans l'état actuel des connaissances. De ce fait, un cancer du poumon faisant suite à une exposition au nickel ou aux composés de chrome(VI), ainsi qu'à la fumée de soudage en général, n'est généralement pas considéré comme une maladie professionnelle. Toutefois, chaque cas doit être examiné individuellement, en tenant compte des antécédents professionnels (utilisation de fils de soudure, durée d'arc/temps de déclenchement), des examens cliniques, des conditions au poste de travail (p. ex. échantillonnage individuel ou mesures de l'air ambiant) et d'autres facteurs (p. ex. syncarcinogenèse en relation avec l'amiante). Il faut en outre tenir compte du temps de latence des tumeurs solides du poumon, qui varie entre un minimum de 10 ans et un maximum de 50 ans [HSL].

3.3. Appareil locomoteur

Le travail de soudage est en grande partie statique. Selon l'équipement, il faut tenir en même temps la torche et l'écran de protection. L'ouvrier doit parfois soulever des pièces lourdes. Les problèmes ergonomiques dépendent aussi de la taille des pièces à souder: pour les petites pièces fabriquées en série, on peut utiliser un établi; pour les grosses pièces, en revanche, il est rare qu'il existe des postes de travail ergonomiques. Le travail dans un espace restreint et au-dessus de la hauteur de la tête crée également des situations défavorables, avec des postures forcées. Le procédé de soudage employé influe lui aussi sur les efforts imposés à l'appareil locomoteur. Ainsi, pour le soudage avec des électrodes enrobées, il faut changer d'électrode toutes les 2 minutes environ, ce qui oblige le soudeur à bouger un tant soit peu. Dans d'autres procédés (MIG/MAG), en revanche, on peut travailler plus longtemps sur la pièce et les contraintes statiques sont donc plus importantes.

3.4. Champs électromagnétiques

Le soudage électrique produit des champs électriques et magnétiques. En termes de risques pour la santé, les champs électriques sont négligeables du fait de leur tension relativement faible. En revanche, les champs magnétiques peuvent être importants à cause de l'intensité électrique élevée. Les procédés de soudage à l'arc (MIG, MAG et TIG) et le soudage par points en particulier font appel à des courants de haute intensité (jusqu'à 750 A). Les champs magnétiques produisent des courants dans le corps humain parce qu'ils agissent sur les molécules chargées électriquement. Les effets indésirables directs des champs magnétiques intenses démontrés scientifiquement comprennent des phénomènes d'irritation des cellules musculaires et nerveuses ou encore des phosphènes rétiens (perceptions lumineuses subjectives, provoquées par la stimulation électrique des cellules rétiennes). Autre effet impor-

tant pour la pratique de la médecine du travail: ces champs perturbent le fonctionnement des stimulateurs cardiaques, des défibrillateurs internes, des neurostimulateurs et autres implants actifs. Des interférences peuvent se produire, en particulier, lors du soudage à l'arc ou par résistance (p. ex. soudage par points ou soudage à haute fréquence de matériaux diélectriques) [Ampport].

Afin d'éviter ces phénomènes de stimulation directe, la Suva a fixé des valeurs limites aux postes de travail pour les champs électriques [Gube], basées sur les niveaux de référence définis et régulièrement vérifiés par l'ICNIRP (Commission internationale de protection contre les rayonnements non ionisants). Une perturbation du fonctionnement des implants médicaux actifs reste toutefois possible même si les valeurs limites aux postes de travail sont respectées. Les paramètres d'efficacité des implants actifs (notamment le seuil de déclenchement électrique) étant adaptés individuellement aux besoins de chaque patient, il n'est pas judicieux de définir un concept général de valeur limite pour la protection des porteurs d'implants. Au lieu de cela, il conviendra de procéder à une analyse individuelle des risques au poste de travail en cas de doute. L'exposition aux champs magnétiques étant définie comme un «danger particulier» selon l'annexe 1 de la directive 6508 de la CFST, l'employeur doit faire intervenir dans ce cas les médecins du travail et autres spécialistes de la sécurité au travail. La norme SN EN 50527-1:2010 définit la procédure d'évaluation d'une exposition possible aux champs magnétiques des porteurs d'implants actifs. La norme SN EN 50527-2.1 est la sous-norme portant sur l'évaluation des porteurs de stimulateurs cardiaques. La norme EN 50505 est la norme internationale spécifique concernant l'évaluation de l'exposition des personnes aux champs électriques et magnétiques aux postes de travail de soudage. Afin de réduire l'exposition aux champs magnétiques lors du soudage, les mesures pratiques suivantes peuvent être mises en œuvre:

- porter des gants isolants et des chaussures à semelle en caoutchouc (gants secs en cuir, en caoutchouc ou en matériau ignifuge)
- utiliser la plus faible intensité électrique possible (pas plus de 400 A)
- augmenter la distance entre le travailleur et les câbles ou la source d'alimentation électrique du soudage
- veiller à la disposition des câbles de soudage: câbles aller et retour le plus près possible l'un de l'autre, enroulés si possible; placer la borne de masse le plus près possible de la soudure
- prendre des mesures d'isolation
- éviter autant que possible de porter les câbles de soudage au corps ou par-dessus l'épaule et de se tenir dans une boucle de câble
- ne pas réaliser de soudures courtes ou de points en succession rapprochée; faire une pause de 10 secondes après chaque section

- en cas de difficultés d'allumage (p. ex. surface encrassée), ne pas taper l'électrode à coups rapprochés sur la pièce; attendre environ 10 secondes avant la tentative d'allumage suivante
- déterminer et marquer les zones dangereuses dans l'entreprise et définir des restrictions d'accès aux porteurs d'implants
- pour les postes de travail mobiles, fournir des informations détaillées aux porteurs d'implants
- s'ils ressentent des symptômes (vertige, faiblesse, etc.), les porteurs d'implants doivent immédiatement cesser de souder, ranger l'appareil de soudage, s'écarter du générateur de soudage et consulter un médecin si nécessaire

3.5. Ouïe

Selon le procédé, la pièce ou les paramètres électriques, le soudage peut être un travail très bruyant, dépassant le niveau d'exposition au bruit L_{EX} de 85 dB(A) fixé dans la liste suisse des valeurs limites d'exposition aux postes de travail [Ladou]. C'est en particulier le cas lors de la découpe au plasma, de l'oxycoupage au chalumeau et du chauffage à la flamme. Il est nécessaire également de prendre en compte la présence d'autres sources de bruit aux postes de travail voisins pour le niveau sonore ambiant. Pour en savoir plus sur l'estimation de l'exposition au bruit au poste de travail, voir les tableaux des niveaux sonores de la Suva et extra.suva.ch (mot-clé «bruit»).

3.6. Peau

Quelques substances présentes au poste de travail du soudeur peuvent causer des **dermites par contact allergiques ou toxiques**. Il peut s'agir aussi bien de certains métaux que de composants des peintures et vernis appliqués sur le matériau à souder. Alors que le chrome, ses alliages et les objets chromés ne provoquent pas de sensibilisation ni même de poussées d'eczéma chez les personnes allergiques aux dichromates, les dichromates hexavalents hydrosolubles causent une sensibilisation cutanée et ont également une action toxique irritante. Ces composés de chrome sont présents dans les électrodes et les matériaux de soudage auxiliaires, les peintures et les vernis. Les gants de protection étaient autrefois en cuir tanné avec des dichromates hexavalents et pouvaient déclencher des allergies.

Le nickel métallique et certains de ses composés, comme le cobalt et ses composés, ont également un effet de sensibilisation cutanée et peuvent jouer un rôle dans les dermites allergiques. Ils sont présents dans la fumée, en particulier, lors du soudage d'aciers fortement alliés, et peuvent se déposer sur la peau.

Si la flamme du chalumeau chauffe des couches d'apprêt, des peintures pour métaux ou des vernis, ceux-ci peuvent dégager des substances irritantes ou sensibilisantes pour la peau:

formaldéhyde, phtalates, anhydride trimellitique, isocyanates, époxy, acrylates, phénols, etc. Les dermatites par contact des soudeurs sont plus souvent dues à des dépôts de substances qu'à la fumée, et peuvent donc aussi toucher le visage.

Les ultraviolets produits par le soudage à l'arc et la flamme de soudage peuvent provoquer une dermatite («**coup de soleil**») sur les zones de peau non protégées, par exemple le cou ou les avant-bras. L'action chronique des UV peut provoquer des lésions précancéreuses et cancéreuses de la peau: une étude danoise a mis en évidence des **kératoses actiniques** et des **carcinomes basocellulaires** (BCC) en relation avec le soudage sous protection gazeuse, avec un rapport de risque de l'ordre de 2,5. En revanche, les carcinomes épidermoïdes (SCC) n'étaient pas plus fréquents, et les données étaient insuffisantes pour le mélanome (CMM) [Heltoft]. Pour plus d'informations sur les lésions cutanées provoquées par les UV, voir la publication de la Suva «Les dermatoses professionnelles» [Rast].

Les étincelles, scories, pièces métalliques incandescentes, mais aussi les explosions et les incendies peuvent occasionner des **brûlures**, en particulier aux mains et au visage.

3.7. Fièvre des métaux (fièvre des soudeurs, des fondeurs, des braseurs...)

Certains métaux peuvent provoquer la «fièvre des métaux» ou fièvre des soudeurs. Il s'agit d'une réaction inflammatoire de tout l'organisme avec élévation de différents marqueurs inflammatoires (leucocytes, PCR) et baisse du fibrinogène [Kim]. Cette réaction est provoquée par la fraction alvéolaire d'oxydes métalliques, notamment de zinc. Les oxydes de cuivre et de magnésium sont fréquemment incriminés, plus rarement ceux de manganèse, de nickel, de fer, de cadmium, d'antimoine, de sélénium ou d'étain. Jusqu'à un soudeur sur trois souffre d'une fièvre des métaux au cours de son travail [McMillan]. La fièvre des métaux peut survenir lors d'autres opérations libérant des oxydes métalliques, par exemple la fonderie ou la galvanisation.

Les premiers symptômes surviennent 4 à 8 heures après la fin de l'exposition à la fumée: irritation nasopharyngée, goût métallique dans la bouche, soif, toux. Un syndrome grippal avec maux de tête et douleurs musculaires, nausées, raideurs et faiblesse peut se développer très rapidement. Une poussée de fièvre se produit entre 8 et 12 heures après l'exposition, suivie de frissons et de sueurs. Les symptômes disparaissent en général après 24 à 36 heures, au plus tard 3 jours, même sans traitement.

Les radiographies pulmonaires ne montrent habituellement aucune lésion et il n'y a pas non plus d'anomalies spirométriques.

Il n'est pas rare que l'exposition chronique aux fumées du soudage produise une légère tolérance, qui disparaît à nouveau après quelques jours sans exposition. Les symptômes peuvent ainsi se manifester davantage au début de la semaine de travail, puis diminuer au fil des jours, ce qui vaut à la fièvre des métaux le nom de «fièvre du lundi matin» dans le monde anglo-saxon. Il n'y a généralement pas de séquelles à long terme.

3.8. Système nerveux

Une exposition prolongée à une concentration supérieure à la VME de métaux tels que le manganèse [Lischka, Plitzko, Meyer-Baron], l'aluminium [Klotz] ou le plomb peut entraîner des déficits neurologiques et neuropsychologiques. L'oxyde de zinc et quelques composés organiques d'étain sont eux aussi neurotoxiques.

Le manganisme, qui affectait autrefois les soudeurs, a été étudié de façon particulièrement détaillée. Au début d'une intoxication par le manganèse, les symptômes prédominants sont l'insomnie, l'instabilité émotionnelle, des troubles de la mémoire, des céphalées et des crampes musculaires. Des symptômes parkinsoniens peuvent s'y ajouter par la suite, avec la dégradation du système de transmission dopaminergique, sans toutefois aller, en général, jusqu'à un syndrome parkinsonien constitué. Les examens neuropsychologiques décrivent, par exemple, des troubles de l'apprentissage verbal, de la mémoire de travail ou encore de la flexibilité cognitive [Bowler].

Bien que les métaux évoqués ci-dessus puissent être présents dans la fumée de soudage, une étude publiée récemment, portant sur 352 soudeurs et 361 plongeurs-soudeurs et traitant de la corrélation entre exposition et effets, n'a démontré aucune neurotoxicité clinique du soudage [Ross].

3.9. Reins

La littérature présente quelques descriptions de cas de glomérulonéphrites et de néphrites interstitielles chez des soudeurs. Une altération de la fonction rénale par des composés de chrome hexavalents solubles et par le cadmium est également signalée. L'expérience à ce jour suggère toutefois qu'il est peu probable que ces néphropathies soient plus fréquentes.

Certaines études signalent un risque accru de cancer de la vessie (HR = 1,4) et du rein (HR = 1,3) [MacLeod]. Ce risque accru pourrait être lié, par exemple, au cadmium qui peut causer des cancers de l'appareil urogénital [Feki-Tounsi].

3.10. Appareil reproducteur

Il semble qu'une baisse de la qualité des spermatozoïdes en fonction de la dose, pouvant entraîner des troubles de la fertilité, puisse se produire lors du soudage, en particulier avec les aciers fortement alliés [OSHA, Rom, CIRC].

3.11. Vibrations

Les ouvriers effectuant des travaux de soudage utilisent souvent aussi des appareils vibrants pour le nettoyage ou le ponçage des pièces [Parizek]. L'utilisation prolongée de ces appareils

peut entraîner des troubles de la sensibilité et de la circulation au niveau des doigts («maladie des doigts blancs» ou syndrome de Raynaud).

4. Prévention en médecine du travail et monitoring biologique

Protéger les travailleurs des substances dangereuses pour la santé au poste de travail passe en priorité par des mesures d'hygiène au travail, qui peuvent être complétées par une prévention en médecine du travail, selon la situation [DGUV].

4.1. Mesures d'hygiène au travail

Les mesures d'hygiène au travail doivent être planifiées et réalisées selon le principe «STOP»: S (mesures de substitution), T (mesures techniques), O (mesures d'organisation), P (mesures au niveau du personnel). Ce principe est expliqué en détail dans la publication «Soudage et coupage» de la Suva.

4.2. Prévention en médecine du travail

La prévention en médecine du travail, au sens de l'ordonnance sur la prévention des accidents et des maladies professionnelles (OPA), a pour but principal d'identifier les travailleurs présentant des facteurs de risque individuels et par conséquent un risque de maladie professionnelle accru, de déceler les maladies professionnelles à leurs débuts et de reconnaître les sollicitations et expositions internes inadmissibles avant qu'une maladie professionnelle ne se déclare, à l'aide d'examens de prévention, comme le monitoring biologique.

Les travailleurs à risque particulier sont assujettis à la prévention en médecine du travail par une décision de la Suva. En ce qui concerne les soudeurs, la Suva demande des examens préventifs en médecine du travail si l'évaluation des risques fait apparaître des risques particuliers, spécialement en cas de dépassement des valeurs limites d'exposition ou lors d'expositions spécifiques. Des paramètres biologiques sont mesurés dans le sang ou les urines afin de déceler une éventuelle exposition interne inadmissible des soudeurs (voir Monitoring biologique).

4.3. Monitoring biologique

Par monitoring biologique, on entend la quantification de l'exposition d'un travailleur à une substance chimique par la mesure de cette substance dans un substrat biologique comme le sang, l'urine ou l'air expiré, ou par la mesure de métabolites ou encore d'un paramètre propre à l'organisme qui soit modifié par cette substance [Jost, Liste des valeurs limites d'exposition

aux postes de travail]. Les valeurs mesurées sont comparées aux VBT (valeurs biologiques tolérables) figurant dans la liste des valeurs limites d'exposition. Le monitoring biologique permet par conséquent d'apprécier la charge interne due à une substance, ou une mise à l'épreuve correspondant à la réaction de l'organisme à la substance en cause (sur la base d'une relation dose-effet entre la concentration de la substance dans l'air ambiant et son effet au niveau de l'organe cible). Le monitoring biologique prend en compte toutes les voies d'absorption d'une substance, c'est-à-dire non seulement l'inhalation, mais aussi l'absorption par voie digestive et transcutanée.

Comme les concentrations dans les substrats biologiques mentionnés sont influencées par différents facteurs, il n'existe pas toujours une bonne corrélation entre les mesures dans l'air ambiant et les valeurs biologiques. Ainsi, l'absorption par inhalation peut varier selon le volume ventilatoire minute, celle par la peau dépend de la qualité de la protection cutanée. Le métabolisme varie en fonction de la situation, et en cas de longue demi-vie d'élimination, une substance peut s'accumuler dans l'organisme (body burden) et être redistribuée par les tissus un certain temps encore après l'exposition. Des interactions avec d'autres solvants ou substances influencent par ailleurs la toxicodynamie et la toxicocinétique. Lors du monitoring biologique, les facteurs d'influence doivent impérativement être identifiés par une anamnèse détaillée et pris en compte dans l'appréciation.

Il existe des VBT pour les substances suivantes, auxquelles les travailleurs peuvent être exposés pendant le soudage:

Substance de travail	Paramètre biologique	VBT	Substrat	Moment du prélèvement
Aluminium	Aluminium	60 µg/g de créatinine	Urine	a
Plomb	Plomb	Hommes: 400 µg/l Femmes >45 ans: 400 µg/l Femmes <45 ans: 100 µg/l	Sang	a
Composés fluorés inorganiques	Fluorure	4 mg/g de créatinine	Urine	b
Cadmium	Cadmium	5 µg/g de créatinine	Urine	a
Cobalt	Cobalt	30 µg/l	Urine	b
Monoxyde de carbone	CO-Hb	5 %	Sang	b
Manganèse	Manganèse	20 µg/l	Sang	c, b
Nickel	Nickel	45 µg/l	Urine	c, b
Composés de nickel insolubles	Nickel	10 µg/l	Urine	c, b
Sels de nickel solubles	Nickel	40 µg/l	Urine	c, b

Valeurs biologiques tolérables (VBT) de quelques substances produites lors du soudage [suva.ch/valeurs-limites: consulté le 28.2.2018]; a: indifférent, b: fin de l'exposition ou du poste, c: exposition de longue durée, après plusieurs périodes de travail, d: avant la reprise du travail

5. Bases légales de la reconnaissance des maladies professionnelles

Les maladies résultant de l'exercice de l'activité professionnelle de soudeur sont reconnues comme maladies professionnelles par la Suva selon les dispositions légales de la LAA (loi fédérale sur l'assurance-accidents), dans la mesure où une relation de cause à effet prépondérante selon les critères de l'art. 9 al. 1 et 2 LAA est établie. Si la substance en question figure dans la liste des substances nocives de l'annexe 1 OLAA, une maladie est reconnue comme maladie professionnelle si elle est due de manière prépondérante à l'exposition à cette substance au cours de l'activité professionnelle (art. 9 al. 1 LAA), autrement dit si la substance nocive représente plus de 50 % du spectre total des causes, ce qui correspond à un risque relatif supérieur à 2 (ATF 293/99 et 119/V200 consid. 2a). Si la substance ne figure pas dans cette liste, le problème de santé doit avoir été causé exclusivement ou de manière nettement prépondérante par l'exercice de l'activité professionnelle avec cette substance pour être reconnu comme maladie professionnelle (art. 9 al. 2 LAA); cette condition est remplie si la substance nocive représente plus de 75 % du spectre total des causes, ce qui correspond à un risque relatif supérieur à 4. Les prestations en cas de reconnaissance d'une maladie professionnelle sont les mêmes qu'en cas d'accident, dans la mesure où les maladies professionnelles sont assimilées à un accident professionnel de par la loi (art. 9 al. 3 LAA).

6. Bibliographie

- Ambroise D. et al.: Update of a meta-analysis on lung cancer and welding; *Scand J Work Environ Health* 2006; 32 (1): 22 - 31.
- Antonini J. M. et al.: Pulmonary effects of welding fumes: review of worker and experimental animal studies. *Am J Ind Med* 2003; 43 (4): 350 -360.
- Bakerly N. D. et al.: Fifteen-year trends in occupational asthma: data from the Shield surveillance scheme; *Occup Med* 2008; 58 (3): 169-174.
- Bakerly N. D. et al.: Fifteen-year trends in occupational asthma: data from the Shield surveillance scheme; *Occup Med* 2008; 58 (3): 169-174.
- Balindt P.: Lungenkrebsrisiko durch berufliche Exposition gegenüber Nickel und seinen Verbindungen. Inaugural-Dissertation. Hohe Medizinische Fakultät der Ruhr-Universität Bochum (2009).
- Banga A. et al.: A study of characteristics of Michigan workers with work-related asthma exposed to welding; *J Occup Environ Med* 2011; 53 (4): 415-419.
- BAuA (Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin): TRGS (Technische Regel für Gefahrstoffe) Merkblatt Nr. 528: «Schweisstechnische Arbeiten» (2009).
- BAuA (Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin): TRGS (Technische Regel für Gefahrstoffe) Merkblatt zur Berufskrankheit Nummer 4115 «Lungenfibrose durch extreme und langjährige Einwirkung von Schweisssrauchen und Schweißgasen - (Siderofibrose)» (Bek. des BMAS vom 30.12.2009).
- Baur X. et al.: Bronchial asthma and COPD due to irritants in the workplace - an evidence-based approach; *J Occup Med Tox* 2012; 7 (19): 1 - 31.
- Beckett W. S. et al.: Airway reactivity in welders: a controlled prospective cohort study. *J Occup Environ Med* 1996, 38 (12): 1229 - 1238.
- BGHM: BGI 593. Schadstoffe beim Schweißen und bei verwandten Verfahren. 2012.
- Blättler M. A.: Coupage et soudage. Protection contre les fumées, poussières, gaz et vapeurs. Suva. Réf. 44053 (2012).
- BMAS: Merkblatt zur Berufskrankheit N° 4106 «Erkrankungen der tieferen Atemwege und der Lungen durch Aluminium und seine Verbindungen» (2009).
- Bowler R. M. et al.: Neuropsychological sequelae of exposure to welding fumes in a group of occupationally exposed men; *Int J Hyg Environ Health* 2003; 206: 517-529.
- Brüning T. et al.: Wissenschaftliche Datenlage zur BK-Nr. 1103 im Hinblick auf die kanzerogene Wirkung von Chrom(VI)-Verbindungen (2015) ASU 50:666-76.
- Byber K. et al.: Cadmium or cadmium compounds and chronic kidney disease in workers and the general population: a systematic review; *Crit Rev Toxicol* (2016) 46(3): 191-240.
- Casarett & Doull's Toxicology, Seventh Edition, Curtis D. Klaassen (2008).

Cole P., Rodu B.: Epidemiologic studies of chrome and cancer mortality: a series of metaanalyses; Regul Toxicol Pharmacol 2005; 43: 225-231.

Colomina M. T. et al.: Aluminium and Alzheimer's Disease. Adv Neurobiol (2017) 18:183-197.

DGUV (Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung: informations): Handlungsanleitung für die arbeitsmedizinische Vorsorge nach dem Berufsgenossenschaftlichen Grundsatz G39 «Schweissrauche», BGI/GUV-I 504-39 Juin (2009).

DGUV: Chrom(VI)-Verbindungen bzw. Nickeloxide beim Schweißen und bei verwandten Verfahren – Schutzmassnahmen am Arbeitsplatz; Fachausschuss-Informationsblatt N° 036; édition 11/2008.

CFST (Commission fédérale de coordination pour la sécurité au travail): Directive 6509 «Soudage, coupage et techniques connexes appliqués à l'usinage des matériaux métalliques» (1999).

El-Zein M. et al.: Prevalence and association of welding related systemic and respiratory symptoms in welders; Occup Environ Med 2003; 60 (9): 655-661.

Erkinjuntti-Pekkanen Riitta et al.: Two year follow-up of pulmonary function values among welders in New Zealand; Occup Environ Med 1999; 56: 328-333.

Feki-Tounsi M. et al.: Cadmium as a possible cause of bladder cancer : a review of accumulated evidence; Environ Sci Pollut Res Int 2014; 21:10561-73.

Forey B.A. et al.: Systematic review with meta-analysis of the epidemiological evidence relating smoking to COPD, chronic bronchitis and emphysema; BMC Pulmonary Medicine 2011; 11(36): 1-61.

Grimsrud T. K. et al.: Exposure to different forms of nickel and risk of lung cancer; Am J Epidemiol 2002; 156: 1123-1132.

Gube M. et al.: Experimental exposure of healthy subjects with emissions from a gas metal arc welding process – part II: biomonitoring of chromium and nickel. Int Arch Occup Environ Health 2013; 86: 31-37.

Hakansson N. et al.: Arc and resistance welding and tumours of the endocrine glands: a Swedish case-control study with focus on extremely low frequency magnetic fields; Occup Environ Med 2005; 62: 304-308

Heltoft K.N. et al.: Metal arc welding and the risk of skin cancer ; Int Arch Occup Environ Health 2017; 90 (8): 873-81

Hiller J. et al.: Künstliche UV-Strahlung durch Schweißen und Aderhaut-Melanome. Ein wissenschaftliche Bewertung des Zusammenhangs auf Basis des deutschen Berufskrankheitenrechts (2015) ASU 51: 201-210.

Holm M. et al.: Incidence and prevalence of chronic bronchitis. Impact of smoking and welding. The RHINE study; Int J Tuberc Lung Dis 2012; 16 (4): 553-557.

HSL (Health and Safety Laboratory): Annex 2 - Draft Statement of Evidence - Health effects arising from inhalation exposure to welding fume. 1 - 10 (2009).

CIRC (Centre international de recherche sur le cancer): IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. Chromium, Nickel and Welding. Volume 49. 1990: 447 - 525.

IIW (International Institute of Welding), Commission VIII - Health, Safety and Environment: Lung cancer and arc welding of steels 2001; 55: 12 - 20.

Suva: Monitoring biologique et valeurs biologiques tolérables. Factsheet Suva 2018.

Kendzia B.: Welding and lung cancer in a pooled analysis of case control studies (2013) Am J Epidemiol, 178;19:1513-25.

Kim J. Y. et al.: Exposure to welding fumes is associated with acute systemic inflammatory response; Occup Environ Med 2005; 62: 157-163.

Klotz K. et al.: The health effects of Aluminium Exposure. Dtsch Arztebl Int (2017) 114;39:653-659.

Suva: Risques pour la santé dus au soudage. Factsheet 2018, Suva.

Ladou J.: Current Occupational & Environmental Medicine. Fourth Edition. McGraw Hill (2007).

Lillienberg L. et al.: A Population-based Study on Welding Exposures at Work and Respiratory Symptoms; Ann Occup Hyg 2008; 52 (2): 107-115.

Lischka K. et al.: Heidelberger Mangan-Studie Follow-up. Forschungsprojekt F 1858 der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (2007).

Marongiu A. et al.: Are welders more at risk of respiratory infections? Thorax (2016) 71;7:601-06.

McMillan G. in: Hendrick David J. et al.: Occupational Disorders of the Lung. Recognition, Management, and Prevention. Elsevier Science 2002: 467 - 482.

Meyer-Baron M. et al: Performance alterations associated with occupational exposure to manganese - a meta-analysis; Neurotoxicology 2009; 30: 487 - 496.

Moulin J. J. et al.: A meta-analysis of epidemiologic studies of lung cancer in welders; Scand J Work Environ Health 1997; 23: 104 - 113.

Müller K.-M., Verhoff M. A.: Graduierung der Sideropneumokoniosen; Pneumologie 2000; 54: 315 - 317.

Nordberg G. F. et al.: Handbook on the toxicology of metals, third edition, Academic Press (2007).

OSHA (Occupational and Health Administration): Occupational Safety and Health Guideline for Welding Fumes. <http://www.osha.gov/SLTC/healthguidelines/weldingfumes/recognition.html> (consulté le 17 janvier 2013).

Palmer K. T. et al.: Exposure to metal fume and infectious pneumonia. Am J Epidemiol 2003; 157 (3): 227 - 233.

Palmer K. T. et al.: Mortality from infectious pneumonia in metal workers: a comparison with deaths from asthma in occupations exposed to respiratory sensitizers. Thorax 2009. 64 (11): 983 - 986.

- Parizek M.: Troubles de santé dus aux vibrations. Suva. Réf. 2869/16 (1998).
- Pesch B. et al.: WELDOX - Metallbelastungen beim Schweißen und deren gesundheitliche Auswirkungen. IPA-Journal 2011; 2: 12 - 17.
- Pletscher C., Liechti B.: Plomb et risques professionnels. Suva. Réf. 2869/06 (2007).
- Plitzko S. et al.: Qualitative und quantitative Erfassung von Schweißrauch als Grundlage für die Bewertung der inneren Manganbelastung (Biomonitoring); Gefahrstoffe - Reinhaltung der Luft 2006; 66: 25.
- Racette B.: Exposure to manganese and parkinsonism - epidemiological evidence. Vortrag am International Symposium «Exposure to Manganese and Neurotoxicity in Welders», IPA Bochum, 09.05.2012.
- Rast H.: Les dermatoses professionnelles. Suva. Réf. 2869/11 (2009).
- Rom W. M.: Environmental & Occupational Medicine. Third Edition. Lippincott-Raven Publishers (1998).
- Ross J. A. S. et al.: Cognitive Symptoms and Welding Fume Exposure. Ann Occup Hyg 2013; 57(1): 26-33.
- MacLeod J. S. et al.: Cancer Risks among Welders and Occasional Welders in a National Population-Based Cohort Study : Canadian Census Health and Environmental Cohort ; Saf Health Work 2017 ; 8(3) : 258-66.
- Michaelsen Slagor R. et al.: The risk of cataract in relation to metal arc welding. Scand J Work Environ Health (2016) 42;5:447-53.
- Suva: Valeurs Limites d'exposition aux postes de travail. Réf. 1903 (2018).
- Szram J. et al.: Welding, longitudinal lung function decline and chronic respiratory symptoms: a systematic review of cohort studies. Eur Respir J 2012; Epub ahead of print.
- Suva: Compatibilité électromagnétique (CEM) d'implants médicaux actifs au poste de travail. Factsheet Suva Médecine du travail (2009).
- Virk S. A. et al.: Occupational Exposure to Aluminium and Alzheimer Disease. A Meta-Analysis (2015) JOEM; 57(8):893-6
- Tarlo S. M. et al.: Occupational and environmental lung diseases. Wiley-Blackwell (2010).
- Thaon I. et al.: Increased lung function decline in blue-collar workers exposed to welding fumes. Chest 2012; 142 (1): 192 - 199.
- Triebig G. et al.: Arbeitsmedizin. 3. vollständig neubearbeitete Auflage. Gentner-Verlag (2011).
- Wong A. et al.: Welders are at increased risk for invasive pneumococcal disease. Int J Infect Dis (2010) e791-9.
- Wieners D. et al.: Epidemiologische und klinische Untersuchungen akuter und chronischer obstruktiver Atemwegserkrankungen durch Schweißgase und -rauche; Zblatt Arbeitsmed 2000; 50 (2): 46 - 64.

Wieners D. et al.: Inhalative Belastungen durch Schweissverfahren; Zblatt Arbeitsmed 2000; 50: 38 - 44.

Zeidler-Erdely P. C. et al.: Immunotoxicology of arc welding fume: worker and experimental animal studies. J Immunotoxicol 2012; 9 (4): 411 - 425.