

Aluminium et ses composés minéraux

Fiche toxicologique n°306

Généralités

Cette fiche traite des principaux composés minéraux de l'aluminium utilisés dans l'industrie.

Edition _____ Avril 2021

Formule :

Al

Substance(s)

Nom	Détails
Aluminium	Numéro CAS 7429-90-5
	Numéro CE 231-072-3
	Numéro index 013-001-00-6 (aluminium en poudre pyrophorique) / 013-002-00-1 (aluminium en poudre stabilisée)
Chlorure d'aluminium	Numéro CAS 7446-70-0
	Numéro CE 231-208-1
	Numéro index 013-003-00-7
Fluorure d'aluminium	Numéro CAS 7784-18-1
	Numéro CE 232-051-1
	Numéro index
Sulfate d'aluminium	Numéro CAS 10043-01-3
	Numéro CE 233-135-0
	Numéro index
Nitrate d'aluminium	Numéro CAS 13473-90-0
	Numéro CE 236-751-8
	Numéro index
Hydroxyde d'aluminium	Numéro CAS 21645-51-2
	Numéro CE 244-492-7
	Numéro index

Etiquette





Aluminium en poudre (stabilisée)

Danger

- H261 - Dégage au contact de l'eau des gaz inflammables
- H228 - Matière solide inflammable

Les conseils de prudence P sont sélectionnés selon les critères de l'annexe 1 du règlement CE n° 1272/2008.

231-072-3

Numéros Index – noms chimiques	Etiquetage selon le règlement CLP (CE n° 1272/2008)
N° 013-001-00-6 (aluminium en poudre (pyrophorique))	 <p>Danger, H261, 250</p>
Numéros Index – noms chimiques	Etiquetage selon le règlement CLP (CE n° 1272/2008)
N° 013-003-00-7 (chlorure d'aluminium)	 <p>Danger, H314</p>

Pour l'étiquetage selon le règlement (CE) n° 1272/2008 (dit CLP), les conseils de prudence P sont sélectionnés selon les critères de l'annexe I de ce règlement.

Caractéristiques

Utilisations

[1 à 13]

L'aluminium métal et ses composés minéraux ont de nombreuses applications industrielles :

- **Aluminium métal**
 - Fabrication d'alliages à base d'aluminium : plusieurs métaux peuvent être alliés avec l'aluminium, par exemple le cuivre, le silicium, le zinc, le magnésium, le manganèse ou bien le chrome, le lithium, le titane ;
 - Fabrication de matériels utilisés dans divers secteurs : câbles électriques aériens ; industrie du bâtiment (portes et fenêtres) ; industrie automobile (pièces moulées résistantes et usinables) ; industrie aéronautique (pièces d'avion) ; constructions navale et ferroviaire ; Fabrication de panneaux de signalisation routière, d'emballages, d'ustensiles de cuisine et de produits destinés au conditionnement de denrées alimentaires (sous forme de feuilles d'aluminium ou de barquettes) ; Utilisation de l'aluminium sous forme de poudre en pyrotechnie et dans la formulation de certaines peintures.
- **Chlorure d'aluminium** : utilisé sous sa forme anhydre comme catalyseur (acide de Lewis) en synthèse organique dans les réactions de type « Friedel et Crafts » d'alkylation, d'acylation, comme catalyseur de polymérisation ; le chlorure d'aluminium hexahydraté est utilisé pour formuler des antiperspirants et des déodorants ; il est également employé comme floculant et clarifiant pour le traitement des eaux.
- **Fluorure d'aluminium** : principalement dans le procédé électrolytique de production de l'aluminium, utilisation pour la formulation de flux de brasage, utilisation dans la fabrication de céramique ; il est également employé comme inhibiteur de fermentation et comme catalyseur en synthèse organique.
- **Sulfate d'aluminium** : utilisé pour le traitement des eaux et des boues d'épuration, comme floculant dans l'industrie du papier, pour le tannage du cuir, comme mordant pour les textiles, comme intermédiaire de synthèse des zéolithes et autres dérivés d'aluminium et également comme catalyseur.
- **Hydroxyde d'aluminium** : utilisé comme intermédiaire de synthèse chimique ; il est aussi utilisé pour fabriquer les caoutchoucs et matières plastiques (en tant que retardateur de flamme), le verre, les céramiques, les encres, les peintures ; il entre aussi dans la composition de cosmétiques tels que les antiperspirants et dentifrices ainsi que dans la composition de produits pharmaceutiques.
- **Nitrate d'aluminium** : utilisé pour le tannage du cuir, comme mordant pour les textiles, dans la fabrication des filaments incandescents, pour l'extraction de l'uranium, comme inhibiteur de corrosion, comme agent de nitrification et également utilisé dans les produits antiperspirants.

Propriétés physiques

[2 à 15]

L' **aluminium** est un métal de couleur argent, très léger donc de faible densité, malléable et ductile. Il peut être facilement travaillé à basse température et déformé sans se rompre. Il possède une conductibilité thermique relativement élevée et une bonne conductibilité électrique. Il est insoluble dans l'eau.

Le **chlorure d'aluminium** peut se présenter sous différentes formes (cristaux, poudre de couleur blanche à jaunâtre) ; il est hygroscopique, il est très déliquescent et il est soluble dans l'eau et dans certains solvants organiques tels que le benzène, le tétrachlorure de carbone et le chloroforme. Il est également disponible sous forme d'hexahydrate.

Le **nitrate d'aluminium** est disponible commercialement sous sa forme stable de nitrate d'aluminium nonahydraté se présentant sous forme de cristaux incolores (système cristallin : rhombique) ; le nitrate d'aluminium est soluble dans l'eau et l'alcool, très peu soluble dans l'acétone. Il est très hygroscopique.

Le **sulfate d'aluminium** peut se présenter sous différentes formes (cristaux, granulés ou poudre de couleur blanche) ; il est hygroscopique, facilement soluble dans l'eau et insoluble dans l'éthanol. Il existe sous diverses formes hydratées.

Le **fluorure d'aluminium** peut se présenter sous la forme de poudre ou de cristaux incolores à blancs ; il est hygroscopique, peu soluble dans l'eau et insoluble dans l'acétone et l'alcool. Il est également disponible sous forme d'hydrates (mono- et tri-).

L' **hydroxyde d'aluminium** peut se présenter sous la forme de poudre blanche ou de cristaux blancs selon différents systèmes cristallins (orthorhombique, hexagonal, cubique, monoclinique...). Il est amphotère, insoluble dans l'eau et soluble dans les solutions basiques. Il peut exister sous formes combinées d'oxydes et d'hydroxydes hydratés.

Nom Substance	Détails
Aluminium	Formule Al
	N° CAS 7429-90-5
	Etat Physique Solide
	Solubilité Insoluble dans l'eau à 20 °C
	Masse molaire 26,98
	Point de fusion 660 °C
	Point d'ébullition 2 327 à 2 519 °C
	Densité 2,7
	Densité gaz / vapeur -
	Pression de vapeur 0 Pa à 20 °C 130 Pa à 1 284 °C
Chlorure d'aluminium	Formule
	N° CAS 7446-70-0
	Etat Physique Solide
	Solubilité Dans l'eau, 450-458 g/L à 20 °C
	Masse molaire 133,34
	Point de fusion Sublimation à 180 °C
	Point d'ébullition Décomposition à 262 °C
	Densité 2,44
	Densité gaz / vapeur 4,5 - 4,6
	Pression de vapeur 0,003 Pa à 20 °C 1 Pa à 58 °C 133 Pa à 100 °C
Fluorure d'aluminium	Formule
	N° CAS 7784-18-1
	Etat Physique Solide
	Solubilité Dans l'eau, 5,59 g/L à 25 °C
	Masse molaire 83,98
	Point de fusion Sublimation à partir de 1 257 °C
	Point d'ébullition 1 537 °C
	Densité 2,88 - 3,1
	Densité gaz / vapeur -
	Pression de vapeur 133 Pa à 1 238 °C
Sulfate d'aluminium	Formule
	N° CAS 10043-01-3
	Etat Physique Solide

	Solubilité	360 - 364 g/L à 20 °C
	Masse molaire	342,15
	Point de fusion	Décomposition à 770 °C
	Point d'ébullition	-
	Densité	2,71
	Densité gaz / vapeur	-
	Pression de vapeur	-
Nitrate d'aluminium	Formule	
	N° CAS	13473-90-0 (anhydre) ; 7784-27-2 (nonahydrate)
	Etat Physique	Solide
	Solubilité	637 g/L à 25 °C
	Masse molaire	213,01 (anhydre) 375,13 (nonahydrate)
	Point de fusion	73 °C (nonahydrate)
	Point d'ébullition	Décomposition à partir de 135 °C (nonahydrate)
	Densité	1,72 (nonahydrate)
	Densité gaz / vapeur	-
	Pression de vapeur	-
Hydroxyde d'aluminium	Formule	
	N° CAS	21645-51-2
	Etat Physique	Solide
	Solubilité	Insoluble dans l'eau à 20 °C
	Masse molaire	78
	Point de fusion	Décomposition à partir de 230 °C
	Point d'ébullition	-
	Densité	2,42
	Densité gaz / vapeur	-
	Pression de vapeur	< 10 Pa à 20 °C

Propriétés chimiques

[4 à 6, 9 à 12, 15 à 19]

■ Aluminium

L'aluminium est un métal très réducteur qui s'oxyde rapidement dans l'air à température ordinaire en formant une couche d'alumine Al_2O_3 qui le protège de la corrosion. Ses propriétés réductrices en voie sèche sont utilisées en aluminothermie. Il réagit violemment avec le chlore, le fluor, le brome et l'iode pour former les trihalogénures correspondants.

En solution, l'aluminium présente le principal degré d'oxydation $Al(+III)$. L'aluminium pur (> 99,999 %) sous forme massive résiste bien à l'acide nitrique grâce à sa couche protectrice d'alumine ; ce film protecteur est toutefois dissout par l'acide chlorhydrique et par l'acide sulfurique chaud. L'aluminium est attaqué rapidement par des solutions aqueuses d'hydroxydes alcalins avec dégagement d'hydrogène et formation d'aluminates solubles.

Fondu, il forme des alliages avec de nombreux métaux (cuivre, magnésium, manganèse, fer, silicium).

L'aluminium peut aussi exister sous forme de poudre stabilisée (les particules d'aluminium sont enrobées d'huile dérivée du pétrole ou d'acide stéarique ou d'autres lubrifiants) ou sous forme de poudre pyrophorique (particules non revêtues) : la forme stabilisée est inflammable et la forme pyrophorique est spontanément inflammable au contact de l'air et beaucoup plus réactive. Au contact de l'eau, les deux types de poudres dégagent de l'hydrogène ; les copeaux d'aluminium peuvent également réagir avec l'eau pour former de l'hydrogène. L'aluminium à l'état divisé réagit vigoureusement avec les hydrocarbures halogénés, le méthanol, l'acide chlorhydrique, l'acide fluorhydrique, l'acide sulfurique et la soude.

■ Composés minéraux

L'eau décompose le chlorure d'aluminium anhydre en alumine et chlorure d'hydrogène avec un fort dégagement de chaleur. Suite à cette réaction, certains métaux peuvent être attaqués en présence de chlorure d'aluminium et d'humidité. Il réagit violemment avec les alcools, avec le nitrobenzène en présence de phénol. Il forme des composés explosifs avec le nitrate d'ammonium et est incompatible avec notamment le nitrate de butyle, le glycidol, le nitrométhane, les alcènes et le chlorure de méthyle.

Le fluorure d'aluminium peut libérer du fluorure d'hydrogène au contact d'acides forts comme l'acide sulfurique concentré, à chaud. Il forme des aluminates au contact de solutions aqueuses fortement alcalines. En présence de vapeur d'eau et à une température supérieure à 300 °C, il se décompose en formant du fluorure d'hydrogène et de l'alumine.

Le sulfate d'aluminium libère de l'acide sulfurique en présence d'eau ; ses solutions aqueuses réagissent violemment avec les bases, les amines et amides. Des oxydes de soufre et des fumées d'alumine sont émis lorsque le sulfate d'aluminium est chauffé jusqu'à décomposition.

Le nitrate d'aluminium est un oxydant puissant. Il peut réagir violemment en présence d'agents réducteurs tels que nitrures, sulfures, chlorure d'étain, formaldéhyde, esters alkyls, alcools, fer, poussières de zinc et autres combustibles. Ses solutions aqueuses sont acides et il peut corroder certains métaux en présence d'humidité. Des oxydes d'azote, de l'acide nitrique et des fumées d'alumine sont émis lorsque le nitrate d'aluminium est chauffé à une température supérieure à 500 °C.

L'hydroxyde d'aluminium peut réagir violemment avec les acides forts. Un mélange d'hydroxyde de bismuth et d'hydroxyde d'aluminium, coprécipité et réduit par de l'hydrogène à 170-210 °C, est spontanément inflammable à l'air à température ambiante.

VLEP et mesurages

Valeurs Limites d'Exposition Professionnelle

[20, 21]

Des valeurs limites d'exposition professionnelle (VLEP) dans l'air des lieux de travail ont été établies pour l'aluminium et ses composés minéraux.

Substance	Pays	VLEP 8h (mg/m ³)
Aluminium (métal)	France (VLEP indicative - 1985)	10
Aluminium (métal)	Etats-Unis (ACGIH - 2008)	1 (fraction alvéolaire)
Aluminium (métal)	Allemagne (valeurs MAK)	4 (fraction inhalable) 1,5 (fraction alvéolaire)
Aluminium (fumées de soudage)	France (VLEP indicative - 1987)	5
Aluminium (fumées de soudage)	Etats-Unis (NIOSH, en Al)	5
Aluminium (pulvérulent)	France (VLEP indicative - 1987)	5
Aluminium (pulvérulent)	Etats-Unis (NIOSH, poudre d'aluminium pyrophorique)	5
Aluminium (sels solubles)	France (VLEP indicative - 1985)	2
Aluminium (sels solubles)	Etats-Unis (NIOSH, en Al)	2
Aluminium (composés insolubles)	Etats-Unis (ACGIH - 2008)	1 (fraction alvéolaire)
Aluminium (composés insolubles)	Allemagne (valeurs MAK)	4 (fraction inhalable) 1,5 (fraction alvéolaire)
Hydroxyde d'aluminium	Allemagne (valeurs MAK)	4 (fraction inhalable) 1,5 (fraction alvéolaire)

Méthodes d'évaluation de l'exposition professionnelle

[77 à 90]

Les méthodes proposées et validées pour la détermination de l'aluminium et de ses composés minéraux comprennent les étapes suivantes :

- Prélèvement de la fraction inhalable des particules par pompage de l'air au travers d'une cassette contenant un filtre (en fibre de verre ou de quartz) ou une membrane (en esters de cellulose mixtes ou polychlorure de vinyle), avec éventuellement une capsule soudée à la cassette (AccuCap TM ou équivalent) ;
- Récupération des poussières déposées sur les parois et traitement du filtre adapté à sa nature et à la solubilité des composés présents :
 - Mise en solution de l'aérosol et du filtre par un mélange d'acides (nitrique, fluoronitrique, perchloronitrique, ...) à adapter selon la nature des composés considérés ;
 - Digestion à l'aide des micro-ondes ;
- Dosage de l'élément Aluminium par spectrophotométrie d'absorption atomique flamme (SAA flamme), par spectrophotométrie d'absorption atomique avec atomisation électrothermique (SAA-AET), par spectrométrie d'émission à plasma (ICP-AES) ou par spectrométrie de masse à plasma (ICP-MS).

Incendie - Explosion

[10 à 12, 14, 17, 22 à 25]

Sous forme finement divisée, l'aluminium métal peut être considéré soit comme matière solide inflammable (cas de la poudre d'aluminium stabilisée), soit comme matière solide pyrophorique (cas de la poudre d'aluminium non stabilisée). Les poussières d'aluminium produites par le meulage et le polissage de pièces en aluminium ou alliages d'aluminium sont combustibles et forment avec l'air des mélanges explosifs (concentrations minimales d'explosion comprises entre 40 et 140 g/m³ selon la granulométrie). Sous ses formes les plus divisées (poudres, copeaux...), l'aluminium peut constituer un facteur aggravant au sein d'un incendie, notamment lorsqu'il est en contact avec d'autres produits (cf. Propriétés chimiques, dégagement d'hydrogène au contact de l'eau).

Les principaux composés de l'aluminium mentionnés dans le tableau I sont incombustibles. Le nitrate d'aluminium est, quant à lui, comburant et peut donc favoriser une réaction de combustion.

En cas d'incendie impliquant de l'aluminium, les agents recommandés seront exclusivement des poudres agissant sur les feux de classe D (feux de métaux). L'utilisation d'agents d'extinction à base d'eau (y compris d'eau additivée et de mousse) est à proscrire afin d'éviter tout dégagement d'hydrogène.

En présence d'aluminium sous forme divisée, les agents extincteurs pouvant remettre en suspension les poudres en combustion sont à proscrire (dioxyde de carbone, poudres...). En effet, le soulèvement de la poudre par le souffle de projection de l'agent extincteur formera une atmosphère explosive susceptible de s'enflammer en présence de la combustion déjà présente.

En cas d'incendie impliquant les autres composés de l'aluminium (chlorure, fluorure, sulfate, nitrate, hydroxyde ; non combustibles), choisir l'agent d'extinction en fonction des autres produits/matériaux impliqués. Si possible, déplacer les récipients exposés au feu. Refroidir les récipients exposés ou ayant été exposés au feu à l'aide d'eau pulvérisée.

Concernant les cas particuliers d'un incendie à proximité de chlorure, de fluorure ou de sulfate d'aluminium, l'utilisation d'eau ou d'agents d'extinction à base d'eau (y compris d'eau additivée et de mousse) est à proscrire en raison des réactions et des produits générés (cf. Propriétés chimiques).

En raison de la toxicité des fumées émises (oxydes d'aluminium, oxydes de soufre, oxydes d'azote, acide nitrique, chlorure d'hydrogène, fluorure d'hydrogène), lors d'un incendie impliquant l'aluminium et ses composés, les intervenants seront équipés de combinaisons spéciales et d'appareils de protection respiratoire isolants.

Pathologie - Toxicologie

Toxicocinétique - Métabolisme

Chez l'animal, l'absorption de l'aluminium par voie orale est très faible ; elle est quasiment nulle par voie percutanée et, par inhalation, aucune donnée n'est disponible. Une fois dans l'organisme, l'aluminium se lie à des protéines sanguines et est distribué dans de nombreux organes, principalement les os et les poumons. L'aluminium absorbé est majoritairement éliminé via les urines, alors que l'aluminium non absorbé est éliminé via les fèces.

Le même profil toxicocinétique est observé chez l'homme.

Chez l'animal

Absorption

Au contact d'un environnement acide (estomac), l'aluminium est solubilisé sous forme d'un ion libre Al^{3+} , avant d'être précipité sous forme d'hydroxyde d'aluminium insoluble au contact de pH plus élevés (duodénum), forme majoritairement excrétée dans les fèces ; une très faible proportion de l'aluminium ingéré est donc disponible pour l'absorption [26, 27]. Ainsi, chez le rat, à la suite de l'administration d'hydroxyde d'aluminium par voie orale, une biodisponibilité de 0,1 % a été déterminée [8]. À la suite de l'administration répétée de sulfate d'aluminium, les biodisponibilités sont les suivantes : chez les mâles, entre 0,046 et 0,053 %, chez les femelles entre 0,064 et 0,069 % [28]. Chez le lapin, elle est de 0,57 % pour le chlorure, 1,16 % pour le nitrate et 0,45 % pour l'hydroxyde [29].

Par inhalation, aucune donnée chiffrée n'est disponible. Plusieurs études mettent en évidence la rétention pulmonaire de l'aluminium, mais sans augmentation des concentrations en aluminium dans les tissus autres que les poumons [8].

Aucune information quantitative n'est disponible concernant l'absorption percutanée. Toutefois, l'augmentation des taux urinaires en aluminium, mesurés chez des souris exposées quotidiennement par voie percutanée à 0,1 ou 0,4 µg de chlorure d'aluminium pendant 130 jours (soit 0,01 - 0,04 µg Al/j) témoigne de l'absorption de certains composés [30].

Distribution

Chez le rat et le cobaye, l'aluminium (administré de manière répétée, par inhalation, sous forme de chlorhydrate $Al_2Cl(OH)_5$) s'accumule dans les poumons, les glandes surrénales et les ganglions lymphatiques péri-bronchiques [8].

À la suite d'une exposition par voie orale, il est surtout retrouvé dans les os, la rate, le foie et les reins et dans une moindre mesure au niveau du cerveau, des muscles et du cœur [31].

À la suite d'applications sur la peau de souris de 0,4 µg/j de chlorure d'aluminium pendant 20 jours, des niveaux élevés en aluminium sont mesurés dans le foie, les poumons et les reins (une contamination secondaire orale est toutefois évoquée par les auteurs). Une fois dans l'organisme, l'aluminium est capable de traverser la barrière placentaire et de s'accumuler dans le fœtus (notamment au niveau du cerveau) [32] ; il est aussi détecté dans le lait maternel [8].

Excrétion

Chez des rats recevant une dose unique de 35 mg d'aluminium, sous différentes formes de sels, entre 0,015 et 2,27 % de la dose initiale sont éliminés dans les urines dans les heures suivant l'administration [8]. Chez le rat, les demi-vies d'élimination varient selon les organes considérés : entre 13 et 1 635 jours pour le cerveau, entre 7 et 520 jours pour l'os pariétal, entre 400 et 430 pour le foie et les reins et entre 16 et 980 jours pour le sang [13, 27].

L'aluminium non absorbé est retrouvé dans les fèces.

Chez l'homme

Absorption

L'absorption de l'aluminium présent dans la nourriture et l'eau de boisson est très faible : moins de 1 % est absorbé par le tractus gastro-intestinal [8, 13]. En effet, son absorption est influencée par la biodisponibilité des différents sels d'aluminium, par le pH intestinal, et par la présence d'agents complexants dans la nourriture (tels que l'acide carboxylique, l'acide citrique ou le silicium) [13, 26].

Par inhalation, le taux d'absorption a été estimé à partir de la relation entre son excrétion urinaire et la concentration atmosphérique à laquelle les salariés sont exposés : ce taux serait compris entre 1,5 et 2 % [8].

Par voie cutanée, très peu de données sont disponibles. À la suite de l'application de chlorhydrate d'aluminium sur l'avant-bras de deux travailleurs, un taux d'absorption de 0,012 % a été estimé [33].

Distribution

L'aluminium est principalement retrouvé dans le plasma, en grande majorité lié à la transferrine [8]. Il est naturellement présent dans les tissus (30 à 50 mg/kg pc), la moitié dans le squelette et environ un quart dans les poumons [8, 27]. Il est aussi retrouvé, en quantités moindres, dans les muscles, la rate, le foie, le cerveau, le cœur, les reins, les ganglions lymphatiques ou les glandes surrénales [8, 13]. Sa présence dans le cerveau résulte de son passage à travers l'épithélium nasal et d'un transfert axonal [34]. L'aluminium est aussi capable de traverser la barrière placentaire et a été détecté dans le lait maternel [8].

Élimination

Après ingestion, l'aluminium est éliminé dans les urines et l'aluminium non absorbé dans les fèces [7, 8]. La demi-vie d'élimination dépend de la durée d'exposition mais aussi de la redistribution de l'aluminium à partir des sites de stockage ; elle serait triphasique avec une demi-vie urinaire d'environ 7 heures, une de quelques semaines et une demi-vie de plusieurs mois voire années selon l'ancienneté de l'exposition et le type d'exposition [35].

Surveillance biologique de l'exposition

[36]

Le dosage de l'aluminium urinaire en fin de poste et fin de semaine peut être proposé pour la surveillance biologique. Il témoigne à la fois de la charge corporelle et de l'exposition récente à l'aluminium alors qu'un dosage en début de poste après deux jours sans exposition refléterait plutôt la charge corporelle. Une corrélation a été établie avec les effets neurologiques (effets cognitifs) et dans une moindre mesure avec les concentrations atmosphériques. L'aluminium urinaire est un indicateur plus sensible que l'aluminium sanguin (si la fonction rénale est normale).

Le dosage de l'aluminium sérique peut être utile pour apprécier une exposition aiguë ou une exposition récente si elle est élevée ou en cas de perturbation de la fonction rénale. Cependant, pour une exposition inférieure à 5 mg/m³/Al métal, les taux d'aluminium sériques sont peu différents de ceux de la population générale. Des valeurs biologiques d'interprétation (VBI) professionnelles sont disponibles pour l'aluminium urinaire (établies pour protéger des effets cognitifs) ainsi et des VBI issues de la population générale adulte pour l'aluminium urinaire et sanguin.

Toxicité expérimentale

Toxicité aiguë

La toxicité aiguë orale et le potentiel irritant des sels d'aluminium sont fonction de leur solubilité. Les sels les plus solubles (comme le chlorure) possèdent les DL50 les plus faibles et sont corrosifs ; le sulfate d'aluminium, de solubilité intermédiaire, est moins toxique et provoque une sévère irritation ; les sels les moins solubles sont irritants.

Par voie orale, les DL50 des différents sels d'aluminium sont :

- nitrate d'aluminium, 261 et 286 mg Al/kg pour le rat et la souris,
- chlorure d'aluminium, comprises entre 370 et 750 pour le rat, et entre 220 et 770 mg Al/kg pour la souris,
- sulfate d'aluminium, 980 mg Al/kg pour la souris et supérieure à 730 mg Al/kg pour le rat [8, 27].

Aucun signe clinique n'est précisé.

Irritation, sensibilisation

Le chlorure d'aluminium est corrosif pour les muqueuses et la peau ; l'application pendant 5 jours de cette substance, sur la peau de souris, lapins et cochons, entraîne une inflammation, des ulcérations et la formation de micro-abcès [7]. Par inhalation, les voies respiratoires supérieures sont principalement touchées [11].

Le sulfate d'aluminium et le nitrate d'aluminium sont sévèrement irritants pour la peau et toutes les muqueuses [11, 12].

L'hydroxyde et le fluorure d'aluminium sont des irritants oculaire et respiratoire [11]. L'instillation de fluorure dans les yeux de lapins entraîne un érythème et un œdème de la conjonctive et une hypersécrétion lacrymale, réversibles en 72 heures [11].

Aucun potentiel sensibilisant n'est mis en évidence pour le chlorure et l'hydroxyde d'aluminium [11].

Toxicité subchronique, chronique

[8]

Par voie orale, les sels d'aluminium provoquent des effets hématologiques (chlorure et sulfate), hépatiques (chlorure et nitrate), rénaux (chlorure) et immunologiques (chlorure). D'importantes modifications neurocomportementales sont également observées après exposition par voie orale et comprennent, notamment, une diminution de l'activité motrice et de la coordination, un défaut d'apprentissage et des troubles de la mémoire. Par inhalation, des signes d'inflammation pulmonaire sont rapportés pour le chlorure et le fluorure d'aluminium.

Aucune donnée n'est disponible concernant les effets systémiques du fluorure et de l'hydroxyde d'aluminium ainsi que pour l'aluminium poudre ou métal.

Chez le rat, l'administration de 5 mg/kg de chlorure d'aluminium pendant 10 semaines par voie intrapéritonéale entraîne des effets hématologiques (diminution du nombre de globules rouges et blancs, du taux d'hémoglobine, de l'hématocrite et des plaquettes), rénaux et hépatiques (augmentation des niveaux en acide urique et urée ; augmentation des activités enzymatiques ASAT, ALAT ou LDH) [37]. En revanche, lorsqu'il est administré par gavage ou dans l'eau de boisson, aucun effet n'est rapporté au niveau hématologique (gavage, 13 mg Al/kg/j, 2 semaines, souris), hépatique ou rénal (eau de boisson, 70 mg Al/kg/j, 90 jours, rats ou 49 mg Al/kg/j, 180 jours, souris) [38 à 40].

Le nitrate d'aluminium n'entraîne aucune atteinte hématologique ou rénale (eau de boisson, 284 mg Al/kg/j, 100 jours, rats) [8]. Chez des rats exposés à 79 mg Al/kg/j dans l'eau de boisson, pendant 1 mois, une hyperémie splénique est rapportée ; à partir de 133 mg Al/kg/j, les effets hépatiques apparaissent avec hyperémie et infiltration de monocytes [8].

À la suite d'une exposition au sulfate d'aluminium, une diminution du taux d'hémoglobine et de l'hématocrite est observée chez des rats ayant reçu 54,7 mg Al/kg/j pendant 18 mois dans l'eau de boisson [41]. Aucun effet hépatique ou rénal n'est rapporté chez des souris exposées pendant 20 mois à 979 mg Al/kg/j (dans la nourriture) ou chez des rats et souris exposés respectivement à 0,6 et 1,2 mg Al/kg/j dans l'eau de boisson, durant toute leur vie [8].

Les effets de l'aluminium sur le système immunitaire commencent à être étudiés [42]. Ainsi, le chlorure d'aluminium (64 mg/kg dans l'eau pendant 120 jours) est à l'origine d'une augmentation des niveaux en complexes immuns circulants et d'une inhibition de la fonction immunitaire des érythrocytes, éléments précurseurs au développement de maladies auto-immunes. Il peut aussi induire des réactions d'hypersensibilité de types I et III ; par contre, son implication dans l'expression des marqueurs CD4+ et CD8+ reste à confirmer.

À la suite de l'inhalation pendant 5 mois (6 heures/jour, 5 jours/semaine) de chlorure (0,37 mg Al/m³) ou de fluorure d'aluminium (0,41 mg Al/m³), une augmentation des niveaux de lysosomes, de protéines et de phosphatases alcalines est mesurée dans le liquide bronchoalvéolaire. Une protéinose alvéolaire est rapportée chez des rats, des cobayes et des hamsters exposés à 15, 20 ou 30 mg/m³ de poudre d'aluminium (taille des particules entre 2,5 et 4,8 µm) ; aucune fibrose pulmonaire n'est observée chez le hamster et le cobaye, alors que des foyers de pneumopathie lipidique se développent chez le rat [8].

Des fibroses ont été observées à la suite d'instillations intratrachéales de particules d'oxyde d'aluminium (composé non traité dans cette fiche) [10].

Effets ototoxiques

Effets génotoxiques

[27]

Les composés de l'aluminium ne sont pas mutagènes pour les bactéries et les cellules de mammifères, mais certains sont à l'origine de dommages à l'ADN et affectent l'intégrité et la ségrégation des chromosomes in vitro. Des effets clastogènes sont aussi observés in vivo : aberrations chromosomiques, échanges de chromatides sœurs ou perte de chromosomes.

In vitro

Le fluorure d'aluminium et le chlorure d'aluminium ne sont pas mutagènes et donnent des résultats négatifs aux tests d'Ames sur *Salmonella typhimurium* et *E. coli*. De même, aucun effet mutagène n'est observé sur des cellules de mammifères exposées à du chlorure d'aluminium (cellules de lymphome de souris).

Certains sels sont à l'origine d'effets clastogènes *in vitro* et diminuent la division cellulaire de cellules de mammifères. Ainsi, ont été rapportés des aberrations chromosomiques (hydroxyde d'aluminium - cellules dans lavage péritonéal de rats et de souris), des micronoyaux, des aberrations chromatiques et des échanges de chromatides sœurs (20 µg/mL de sulfate d'aluminium - lymphocytes humains). Des micronoyaux ont aussi été observés dans des lymphocytes humains traités avec du chlorure d'aluminium, avec une augmentation de leur nombre dose dépendante (chlorure d'aluminium hexahydraté, 5-10-20 µM) [43].

Le chlorure d'aluminium est à l'origine d'une diminution des capacités de réparation de l'ADN, chez les lymphocytes humains exposés à 10 µg/mL pendant 72 heures.

In vivo

Le potentiel clastogène de l'aluminium a aussi été observé chez les rongeurs. À la suite d'une exposition par voie intrapéritonéale à 0,01 - 0,05 et 0,1 M de chlorure d'aluminium (soit 44 - 222 et 443 mg/kg), une augmentation des aberrations chromosomiques est rapportée dans les cellules de moelle osseuse de souris (mais sans relation dose réponse). Le chlorure d'aluminium (sous sa forme hexahydratée) entraîne une augmentation du nombre de micronoyaux dans les hépatocytes de rats exposés par voie intrapéritonéale à 5 mg/kg, pendant 120 jours [37]. Il en est de même chez la souris, suite à une exposition par gavage à 49-98 ou 161 mg/kg : le nombre de micronoyaux détectés dans les cellules de moelle osseuse augmente de façon dose dépendante, dès la 1^{ère} dose testée [43].

Les mêmes effets sont rapportés pour le sulfate d'aluminium (212 à 2120 mg/kg, rats, 21 jours).

Effets cancérogènes

Aucune étude n'est disponible à ce jour pour l'aluminium et ses sels concernés par cette fiche.

Effets sur la reproduction

Le chlorure et le nitrate d'aluminium diminuent la fertilité des mâles et des femelles dans différentes espèces animales. Ainsi, une toxicité testiculaire est observée avec perturbation de la spermatogénèse et inhibition des activités enzymatiques ; chez les femelles, des effets au niveau des ovaires ont été rapportés, pouvant contribuer à inhiber l'ovulation. L'hydroxyde d'aluminium n'est à l'origine d'aucun effet tératogène. Le chlorure, le nitrate et le sulfate d'aluminium entraînent une diminution du poids des fœtus et des nouveau-nés, des retards d'ossification, une augmentation du nombre de résorptions, une baisse du nombre de fœtus viables et une augmentation du nombre de malformations. Aux plus fortes concentrations testées, la toxicité maternelle est très importante. Les nouveau-nés de rates exposées à ces différents sels d'aluminium présentent aussi des atteintes au niveau du cerveau et des troubles neurocomportementaux : difficultés d'apprentissage, perturbation de la mémoire et modifications des réponses aux tests d'anxiété.

Fertilité

Concernant les effets sur la fertilité, les résultats sont variables d'une étude à l'autre et dépendent des espèces utilisées (variabilité inter-espèce importante) et des sels d'aluminium testés (de toxicité et de biodisponibilité différentes) [1].

Ainsi, des études réalisées chez la souris mâle (par voie intrapéritonéale, nitrate - 50, 100, 200 mg/kg/j pendant 4 semaines, ou par voie sous-cutanée, chlorure d'aluminium - 7, 13 mg/kg/j pendant 14 jours) et le lapin (par gavage, chlorure - 34 mg/kg/j pendant 16 semaines) ont mis en évidence une toxicité testiculaire (diminution du poids des testicules, nécrose des spermatocytes et des spermatides), une diminution de la qualité du sperme et une baisse de la fertilité [27]. Une étude récente confirme l'impact du chlorure d'aluminium sur la spermatogénèse et les activités enzymatiques testiculaires des rats, à partir de 128 mg/kg/j administrés par voie orale pendant 12 jours [50].

Ces effets ont été récemment mis en évidence pour des concentrations très faibles. Lors d'une étude menée sur 112 jours par gavage (rats adultes, $6,7 \times 10^{-5}$ - $3,35 \times 10^{-4}$ - 10 ou 40 mg/kg p.c/j, gavage), tous les animaux exposés présentaient une diminution du poids des testicules et des épидидymes, et une baisse des taux de testostérone, plus importante aux deux plus faibles doses testées [51]. Des perturbations de la spermatogénèse et de la qualité spermatique sont rapportées dès 1,5 mg/kg d'aluminium (rats, $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, pendant 60 jours, par gavage) [52].

Des effets sur les ovaires ont été récemment mis en évidence chez le rat, à la suite de l'exposition pendant 120 jours à 256 mg/kg de chlorure d'aluminium. Des dommages cellulaires ont été observés (apoptose des cellules, atteintes des organites, enveloppe nucléaire irrégulière) ainsi qu'une diminution des activités enzymatiques ovariennes (acide phosphatase, alcaline phosphatase ou succinate déshydrogénase notamment) et une baisse des niveaux d'expression des récepteurs aux gonadotrophines (FSH et LH) [53]. Selon les auteurs, tous ces effets combinés peuvent inhiber l'ovulation et le développement des corps jaunes et entraîner une infertilité.

Aucun effet n'est observé chez des rates exposées à du nitrate d'aluminium, par gavage (180, 360, 720 mg/kg/j pendant 60 jours) ou dans l'eau de boisson (50, 100 mg/kg/j pendant 15 jours), ou au cours d'une étude multi-génération (0, 120, 600, 3 000 mg/L) [27, 28].

Développement

À la suite d'une exposition par gavage à 0 - 66,5 - 133 ou 266 mg/kg/j d'hydroxyde d'aluminium (soit 0 - 23 - 46 ou 92 mg Al/kg/j), du 6^e au 15^e jour de gestation, les souris ne présentent aucun signe de toxicité maternelle ou d'embryotoxicité [54]. Chez des souris exposées à 300 mg/kg/j par gavage, du 6^e au 15^e jour de gestation, aucune incidence n'est rapportée sur le nombre de pertes post-implantatoires ou de malformations. Chez le rat, aucune toxicité maternelle ou fœtale n'est rapportée jusqu'à 768 mg/kg/j d'hydroxyde d'aluminium, administré via l'eau de boisson, du 6^e au 15^e jour de gestation [27].

L'administration de fortes doses d'aluminium par gavage induit une diminution du poids des fœtus et des nouveau-nés, ainsi qu'un retard d'ossification, chez les rats et les souris [27]. Des rates ont été exposées à 345 mg/kg/j de chlorure d'aluminium (soit 70 mg Al/kg/j) du 1^{er} au 16^e jour de gestation et encore 16 jours après la mise bas, par gavage. Une diminution du gain de poids est rapportée chez les mères, de même que des diminutions du nombre de corps jaunes et de sites d'implantation, du poids du placenta, de la longueur vertex-coccyx et du poids des fœtus. Un retard de l'ossification des os pariétal et caudal a été rapporté [49]. Une augmentation du nombre de résorptions est aussi observée à la suite d'une exposition par gavage à 40 mg Al/kg/j, sous forme de chlorure d'aluminium, pendant les trois premiers jours de gestation des rates ; une exposition similaire du 4^e au 6^e jour de gestation diminue de plus le nombre de gestations et de fœtus viables [55].

L'administration répétée de 0, 75, 100 ou 200 mg/kg/j de chlorure d'aluminium, du 9^e au 13^e ou du 14^e au 18^e jour de gestation, est à l'origine de toxicité maternelle et fœtale. Chez les rates, plusieurs décès sont rapportés aux deux plus fortes doses et les autopsies ont révélé de nombreuses ascites, une adhésion entre organes et des granulomes péri-hépatiques. Chez les fœtus, le poids moyen est diminué dans tous les groupes (excepté chez ceux exposés à 75 mg/kg/j du 14^e au 18^e jour de gestation), le nombre de résorptions et de fœtus morts est augmenté. Compte tenu de la forte mortalité maternelle et fœtale aux deux plus fortes doses, très peu de fœtus ont pu être examinés mais une incidence élevée de fœtus anormaux est toutefois observée à 100 mg/kg/j (doigts ou orteils anormaux, côtes malformées) [27].

L'administration de chlorure d'aluminium via l'eau de boisson (souris, du 6^{ème} jour de gestation au 21^{ème} jour post-natal, 1800 ppm) impacte négativement la neurogenèse de l'hippocampe : chez les nouveau-nés âgés de 21 jours, on note une perturbation de la plasticité synaptique, et des changements dans les signaux glutamatergiques et cholinergiques (Inohara et al 2018).

Le nitrate d'aluminium est aussi à l'origine d'une baisse du poids des fœtus, d'une augmentation du nombre d'avortements, de malformations congénitales, d'anomalies mineures et de variations, chez toutes les rates exposées (administration intragastrique, 180, 360 ou 720 mg/kg/j, du 6^e au 14^e jour de gestation) [27].

Au cours de l'étude multi-génération, un retard dans le développement sexuel est mis en évidence chez les femelles de la génération F1 (retard de l'ouverture vaginale), en lien avec l'inhibition de croissance observée, ainsi qu'une diminution du poids moyen, du poids du foie et de la rate chez les nouveau-nés des générations F1 et F2. À partir de cette étude, une NOAEL de 41 mg/kg/j de sulfate d'aluminium a été déterminée, correspondant à 6,5 mg Al/kg/j [56-57].

Les effets neurocomportementaux ont été étudiés chez les nouveau-nés de rates exposées à 50 ou 100 mg Al/kg pc/j sous forme de nitrate d'aluminium pendant la gestation, puis durant toute leur vie (dans l'eau de boisson). Les nouveau-nés exposés à la plus forte dose présentent une diminution des performances aux tests d'apprentissage spatial et de mémoire réalisés [58]. Les effets du chlorure d'aluminium sur la mémoire ont été étudiés chez les nouveau-nés de rates, exposés à 0, 200, 400, 600 et 800 mg/kg/j, via l'eau de boisson, pendant la lactation (soit 2 semaines). Leur mémoire à court et long terme est perturbée pour la plus forte dose d'exposition [54].

L'hydroxyde d'aluminium est aussi à l'origine d'effets neurocomportementaux chez des nouveau-nés de souris recevant 240 µg/kg d'aluminium en sous-cutané, sur une période de 3 semaines. Des changements de réponse aux tests d'anxiété pratiqués (light/dark test) sont observés pour les mâles et les femelles ; les tests évaluant l'activité locomotrice et le comportement exploratoire sont perturbés uniquement chez les mâles recevant une dose totale de 550 µg/kg d'Al [55].

Comme pour les adultes, les systèmes antioxydants des fœtus et des nouveau-nés sont aussi touchés, suite à une exposition au chlorure d'aluminium, pendant la gestation et pendant les 15 premiers jours de leur vie : les niveaux en glutathion réductase, glutathion peroxydase ou catalase sont diminués [49].

Neurotoxicité

La neurotoxicité de l'aluminium se manifeste de diverses manières : diminution des performances dans les tests neurocomportementaux, changements histopathologiques et perturbations des processus biochimiques. Cette neurotoxicité a été mise en évidence chez de nombreuses espèces, mais avec une variation inter-espèce importante : ainsi, chez les espèces les plus sensibles (lapin, chat, cobaye ou furet), la toxicité se manifeste par une encéphalopathie progressive, entraînant épilepsie et mort. Chez les rongeurs, des effets sur le comportement sont rapportés, en lien avec des troubles des capacités d'apprentissage, de mémorisation et des activités locomotrices [27]. L'absence d'information sur les teneurs en aluminium dans la nourriture et l'eau fournies aux animaux rend par ailleurs difficile l'interprétation et la comparaison des études entre elles.

À la suite de l'administration, via l'eau de boisson, de 80 mg/L de nitrate d'aluminium, pendant 90 jours à des rates, seule la mémoire de reconnaissance est perturbée ; aucun effet sur l'activité motrice n'est rapporté [28].

Chez le rat, différents types d'effets neurocomportementaux sont altérés par le chlorure d'aluminium. Les facultés d'apprentissage et de mémorisation sont diminuées après 6 mois d'exposition à 50 mg/kg/j, via l'eau de boisson, ou après 100 mg/kg/j, administrés par gavage pendant 6 semaines [42, 44]. La coordination est aussi touchée : en effet, chez des rats exposés à 52 mg Al/kg/j, via l'eau de boisson, pendant 90 jours, le réflexe vestibulo-oculaire est perturbé [47]. Enfin, l'activité locomotrice est diminuée à partir de 3 g/L de chlorure d'aluminium dans l'eau de boisson, pendant 4 mois [46].

Des changements histopathologiques sont aussi observés. Chez des lapins exposés à 1 - 1,3 mg Al/kg/j (20 mg/L AlCl₃) pendant 3 mois dans l'eau de boisson, des altérations neuropathologiques ont été observées : atrophie et apoptose des neurones dans le cortex cérébral et l'hippocampe, dégénérescence des cellules de Schwann et démyélinisation des fibres nerveuses [28]. Des effets sur le système glial (gonflement des astrocytes) ont été mis en évidence chez les rats exposés à 3 g/L de chlorure d'aluminium, via l'eau de boisson, pendant 4 mois [48].

Enfin, certains processus biochimiques, localisés au niveau cérébral, peuvent être perturbés. L'induction de stress oxydant a été mis en évidence par de nombreux auteurs, avec des effets au niveau des systèmes enzymatiques, des lipides ou des membranes, notamment [44, 46]. Ainsi, chez des rates exposées à 345 mg/kg/j de chlorure d'aluminium, par voie orale, du 6^e au 15^e jour de gestation, les systèmes antioxydants sont touchés, avec diminution des niveaux en glutathion réductase, glutathion peroxydase ou catalase [49].

Une augmentation des niveaux de peptide bêta-amyloïde (peptide perturbant la transmission synaptique) a aussi été observée après exposition au chlorure d'aluminium [44].

Toxicité sur l'Homme

L'exposition chronique à l'aluminium en milieu professionnel peut être responsable d'effets respiratoires (fibrose pulmonaire lors d'expositions massives actuellement rares, asthme et altérations chroniques de la fonction ventilatoire), pour lesquels le rôle étiologique de l'aluminium reste discuté, et neurologiques (altérations des fonctions psychomotrices, souvent infracliniques). Il n'y a pas d'arguments en faveur d'effets génotoxiques ou cancérigènes attribuables à l'aluminium ; aucune donnée sur d'éventuels effets reprotoxiques en milieu professionnel n'est disponible.

Toxicité aiguë

Il n'y a pas de donnée sur d'éventuels effets liés à une exposition aiguë à l'aluminium en milieu professionnel.

Le rôle de l'aluminium a été suspecté lors d'une contamination accidentelle d'un réseau de distribution d'eau par du sulfate d'aluminium au Royaume-Uni. Des troubles gastro-intestinaux et une éruption cutanée sont principalement décrits dans les jours suivants ; des douleurs musculaires, une asthénie, des troubles de la concentration et de la mémoire sont rapportés dans les semaines et mois suivants. Les données publiées ne permettent cependant pas d'évaluer l'imputabilité de cette symptomatologie à l'ingestion d'aluminium [62].

Toxicité chronique

[1, 5, 8, 62, 63]

■ Effets respiratoires

Ces effets sont observés en milieu professionnel où l'exposition par voie respiratoire est prédominante.

Une fibrose pulmonaire est rapportée lors d'expositions massives à de l'aluminium pulvérulent (fabrication de poudre pyrotechnique, usinage de pièces en aluminium, fonderies de bauxite) ou sous forme de vapeurs (soudage à l'arc de l'aluminium). La symptomatologie associe toux, dyspnée, survenue de pneumothorax spontané, parfois rapidement progressive et évoluant vers le décès. Les explorations fonctionnelles respiratoires retrouvent un syndrome restrictif ou mixte et une diminution de la perméabilité alvéolo-capillaire. Le lavage bronchoalvéolaire et l'analyse minéralogique du parenchyme sont en faveur d'une surcharge pulmonaire en particules d'aluminium [64]. L'aspect histologique est celui d'une fibrose interstitielle diffuse, non spécifique. Les rôles respectifs de l'aluminium et des co-expositions, notamment la silice, dans la pathogénie de cette fibrose, restent encore discutés.

Des cas exceptionnels de granulomatoses pulmonaires sont également décrits (granulomes contenant des particules d'aluminium) [65], ainsi qu'un cas de protéinose alvéolaire, lors d'expositions à des poussières d'aluminium.

Une symptomatologie d'asthme et d'hyperréactivité bronchique est décrite dans les fonderies d'aluminium (« potroom asthma »), à l'occasion de l'extraction électrolytique de l'aluminium. La responsabilité de divers irritants utilisés dans ce secteur d'activité (acide fluorhydrique, divers fluorures, anhydride sulfureux) est suspectée. Cependant, des rapports de cas cliniques évoquent le rôle de l'exposition chronique à l'aluminium ou à ses sels dans la survenue de cet asthme professionnel. Une réaction asthmatique est observée après des tests de provocation chez un ouvrier de fonderie d'aluminium (test de provocation bronchique spécifique au chlorure d'aluminium) [66] et chez un soudeur à l'arc d'aluminium (test de provocation bronchique réaliste lors d'opérations de soudage avec des électrodes enrobées et non enrobées) [67].

Des cas d'asthme professionnel, de mécanisme irritatif suspecté, sont également observés chez des ouvriers de la production de sulfate d'aluminium et de fluorure d'aluminium.

Les études menées dans l'industrie de production de l'aluminium mettent en évidence une altération de la fonction ventilatoire, sans toutefois pouvoir affirmer le rôle causal de l'aluminium.

■ Effets neurologiques

Une trentaine de cas d'encéphalopathie chez des travailleurs fortement exposés à l'aluminium sont rapportés. Le rôle causal de ce métal ne peut cependant être établi du fait du caractère non spécifique des manifestations, de l'évolution indépendante de l'exposition au métal et de l'existence d'autres nuisances professionnelles et extra-professionnelles non prises en compte.

Des études menées en milieu professionnel chez des salariés fortement exposés à l'aluminium par voie respiratoire sont en faveur d'une perturbation des fonctions neurologiques centrales en relation avec l'exposition à l'aluminium. Divers symptômes subjectifs sont rapportés : asthénie, irritabilité, troubles de l'humeur et de la concentration, céphalées. Les tests psychométriques mettent en évidence des effets infracliniques (atteintes de la motricité, de l'organisation visuo-spatiale et de la mémoire) ; certains auteurs rapportent des anomalies électroencéphalographiques (augmentation de l'activité lente et diminution de l'activité alpha dans la région frontale). Ces anomalies sont observées dans différents secteurs professionnels (soudage, fonderie, fabrication de poudre) dans lesquels les co-expositions diffèrent et sont souvent corrélées aux niveaux d'exposition à l'aluminium (concentrations urinaires, sériques et/ou atmosphériques). Elles semblent plus fréquentes pour des concentrations en aluminium qui excèdent en moyenne 108 à 160 µg/L dans les urines et 7 à 9 µg/L dans le sérum d'après certains auteurs [68].

C'est principalement chez des patients insuffisants rénaux dialysés au long cours que l'encéphalopathie à l'aluminium a été décrite, initialement en rapport avec les apports en aluminium dans le liquide de dialyse, associés à la prise orale d'hydroxyde d'aluminium pour contrôler l'hyperphosphatémie des patients [62]. Le tableau associe des troubles du langage, de la mémoire et de la concentration, des troubles de l'humeur et de la personnalité, des hallucinations, une apraxie, des myoclonies, des convulsions, des troubles de conscience ainsi que des anomalies électroencéphalographiques. Chez ces patients, les concentrations plasmatiques d'aluminium sont supérieures à 100 - 200 µg/L. Pour des concentrations plus basses, des perturbations plus discrètes des fonctions psychomotrices seraient susceptibles de survenir dans cette population.

Dans une étude chez des nouveau-nés prématurés, des troubles du développement neurologique corrélés aux apports d'aluminium par l'alimentation parentérale sont mis en évidence [69, 70].

Plusieurs études se sont intéressées au rôle de l'aluminium (exposition professionnelle, exposition chez des patients dialysés, en population générale via l'eau de boisson, la consommation d'antiacides ou l'utilisation d'antiperspirants contenant de l'aluminium) dans la pathogénie de la maladie d'Alzheimer. D'après les expertises les plus récentes, l'aluminium ne peut, en l'état actuel des connaissances, être considéré comme un facteur étiologique de cette maladie [8, 62, 71].

■ Effets cutanés

Des dermatites d'irritation sont rapportées chez des salariés de la production d'aluminium, mais le rôle de l'aluminium en particulier ne peut être affirmé. De nombreux sels d'aluminium peuvent produire une dermatite de contact d'irritation, en cas de contact répété.

Des cas exceptionnels de dermatite de contact allergique professionnelle à l'aluminium sont rapportés [72, 73].

En dehors du milieu professionnel, des cas de dermatite de contact allergique à l'aluminium sont observés suite à l'application d'antiperspirants [74] et de médicaments topiques ainsi qu'après vaccination ou désensibilisation à l'aide d'extraits antigéniques contenant comme adjuvant des sels d'aluminium [75, 76]. Dans ces deux derniers cas, une réaction granulomateuse peut apparaître au niveau du site d'injection.

■ Autres effets

D'autres effets sont observés en dehors du milieu professionnel [73].

Une ostéomalacie et une anémie microcytaire hypochrome sont rapportées chez des patients insuffisants rénaux chroniques dialysés qui présentent une charge corporelle importante en aluminium (concentrations plasmatiques généralement supérieures à 100 µg/L).

De rares cas d'ostéomalacie sont également décrits chez des sujets présentant une fonction rénale normale suite à la prise orale pendant plusieurs années de fortes quantités d'antiacides contenant des sels d'aluminium.

Le rôle de l'aluminium, utilisé dans certains vaccins, a été évoqué dans le développement de la myofasciite à macrophages, lésion inflammatoire musculaire caractérisée par un infiltrat de macrophages contenant des sels d'aluminium au niveau du site de vaccination, parfois associée à des signes généraux non spécifiques (myalgies diffuses, fatigue chronique, arthralgies, dysfonctions cognitives). Une relation causale n'est à ce jour pas établie.

Effets génotoxiques

Aucune donnée n'est disponible chez l'homme à la date de publication de cette fiche.

Effets cancérogènes

Il n'y a pas d'étude chez l'homme qui explore l'hypothèse d'un risque cancérogène directement lié à l'aluminium ou ses composés minéraux.

L'exposition professionnelle lors de la production d'aluminium est classée comme cancérogène pour l'homme par le CIRC (groupe 1) [76]. Dans ce secteur cependant, les excès de risque de cancers, principalement de la vessie et du poumon, sont attribués à l'exposition aux hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) et non à l'aluminium.

Effets sur la reproduction

Aucune donnée n'est disponible chez l'homme en milieu professionnel.

Réglementation

Rappel : La réglementation citée est celle en vigueur à la date d'édition de cette fiche : Avril 2021

Les textes cités se rapportent essentiellement à la prévention du risque en milieu professionnel et sont issus du Code du travail et du Code de la sécurité sociale. Les rubriques "Protection de la population", "Protection de l'environnement" et "Transport" ne sont que très partiellement renseignées.

Sécurité et santé au travail

Mesures de prévention des risques chimiques (agents chimiques dangereux)

- Articles R. 4412-1 à R. 4412-57 du Code du travail.
- Circulaire DRT du ministère du travail n° 12 du 24 mai 2006 (non parue au JO).

Aération et assainissement des locaux

- Articles R. 4222-1 à R. 4222-26 du Code du travail.
- Circulaire du ministère du Travail du 9 mai 1985 (non parue au JO).
- Arrêtés des 8 et 9 octobre 1987 (JO du 22 octobre 1987) et du 24 décembre 1993 (JO du 29 décembre 1993) relatifs aux contrôles des installations.

Prévention des incendies et des explosions

- Articles R. 4227-1 à R. 4227-41 du Code du travail.
- Articles R. 4227-42 à R. 4227-57 du Code du travail.
- Articles R. 557-1-1 à R. 557-5-5 et R. 557-7-1 à R. 557-7-9 du Code de l'environnement (produits et équipements à risques).

Valeurs limites d'exposition professionnelle (Françaises)

- Circulaires du 05 mars 1985 et du 13 mai 1987 modifiant la circulaire du ministère du Travail du 19 juillet 1982 (non parues au JO).

Maladies à caractère professionnel

- Articles L. 461-6 et D. 461-1 et annexe du Code de la sécurité sociale : déclaration médicale de ces affections.

Maladies professionnelles

- Article L. 461-4 du Code de la sécurité sociale : déclaration obligatoire d'emploi à la Caisse primaire d'assurance maladie et à l'inspection du travail ; tableaux n° 16, 16 bis et 32.

Travaux interdits

- Jeunes travailleurs de moins de 18 ans : article D. 4153-17 du Code du travail. Des dérogations sont possibles sous conditions : articles R. 4153-38 à R. 4153-49 du Code du travail.

Entreprises extérieures

- Article R. 4512-7 du Code du travail et arrêté du 19 mars 1993 (JO du 27 mars 1993) fixant la liste des travaux dangereux pour lesquels il est établi par écrit un plan de prévention.

Classification et étiquetage

a) **substance** aluminium et ses composés minéraux :

Le règlement CLP (règlement (CE) n° 1272/2008 modifié du Parlement européen et du Conseil du 16 décembre 2008 (JOUE L 353 du 31 décembre 2008)) introduit dans l'Union européenne le système général harmonisé de classification et d'étiquetage ou SGH. La classification et l'étiquetage de l'aluminium et de ses composés minéraux figurent dans l'annexe VI du règlement CLP. La classification est :

Aluminium en poudre (pyrophorique)

Substance qui, au contact de l'eau, émet des gaz inflammables, catégorie 2 ; H261

Matière solide pyrophorique, catégorie 1 ; H250

Chlorure d'aluminium (anhydre)

Corrosion cutanée, catégorie 1B ; H314

Certains fournisseurs ajoutent les auto-classifications suivantes pour cette substance :

Substance corrosive pour les métaux, catégorie 1 ; H290

Lésions oculaires graves, catégorie 1 ; H318

Toxicité spécifique pour certains organes cibles (poumons) - Exposition répétée, catégorie 1 ; H372

Aluminium en poudre (stabilisée)

Substance qui, au contact de l'eau, émet des gaz inflammables, catégorie 2 ; H 261

Matière solide inflammable, catégorie 1 ; H 228

Les substances **fluorure d'aluminium, sulfate d'aluminium, nitrate d'aluminium et hydroxyde d'aluminium** ne sont pas inscrites à l'annexe VI du règlement CLP et ne possèdent pas d'étiquetage officiel harmonisé au niveau de l'Union européenne. Cependant, certains fournisseurs proposent les auto-classifications suivantes :

Fluorure d'aluminium

Toxicité aiguë (par voie orale), catégorie 4 ; H 302 et/ou

Irritation oculaire, catégorie 2 ; H 319 et/ou

Irritation cutanée, catégorie 2 ; H 315 et/ou

Toxicité spécifique pour certains organes cibles - Exposition unique, catégorie 3 : irritation des voies respiratoires ; H 335

Sulfate d'aluminium

Substance corrosive pour les métaux, catégorie 1 ; H290 et/ou

Lésions oculaires graves, catégorie 1 ; H318 et/ou

Irritation oculaire, catégorie 2 ; H 319 et/ou

Toxicité aiguë (par voie orale), catégorie 4 ; H302 et/ou

Irritation cutanée, catégorie 2 ; H315 et/ou

Toxicité spécifique pour certains organes cibles - Exposition unique, catégorie 3 : irritation des voies respiratoires ; H 335

Nitrate d'aluminium

Matières solides comburantes, catégorie 3 ; H272 et/ou

Matières solides comburantes, catégorie 1 ; H271 et/ou

Lésions oculaires graves, catégorie 1 ; H318 et/ou

Irritation oculaire, catégorie 2 ; H 319 et/ou

Toxicité aiguë (par voie orale), catégorie 3 ; H301 et/ou

Irritation cutanée, catégorie 2 ; H315

Toxicité spécifique pour certains organes cibles - Exposition unique, catégorie 3 : irritation des voies respiratoires ; H 335

Toxicité pour la reproduction (développement), catégorie 2 ; H361

Hydroxyde d'aluminium

Irritation cutanée, catégorie 2 ; H315

Irritation oculaire, catégorie 2 ; H319

Toxicité spécifique pour certains organes cibles - Exposition unique, catégorie 3 : irritation des voies respiratoires ; H 335

Pour plus d'informations, se reporter au site de l'ECHA (<http://echa.europa.eu/web/guest/information-on-chemicals/cl-inventory-database>¹).

¹<http://echa.europa.eu/web/guest/information-on-chemicals/cl-inventory-database>

b) **mélanges** contenant de l'aluminium ou des composés de l'aluminium :

- Règlement (CE) n° 1272/2008 modifié

Protection de la population

Se reporter aux règlements modifiés (CE) 1907/2006 (REACH) et (CE) 1272/2008 (CLP). Pour plus d'information, consulter les services du ministère chargé de la santé.

Protection de l'environnement

Installations classées pour la protection de l'environnement : les installations ayant des activités, ou utilisant des substances, présentant un risque pour l'environnement peuvent être soumises au régime ICPE.

Pour consulter des informations thématiques sur les installations classées, veuillez consulter le site (<https://aida.ineris.fr>) ou le ministère chargé de l'environnement et ses services (DREAL (Directions Régionales de l'Environnement, de l'Aménagement et du logement) ou les CCI (Chambres de Commerce et d'Industrie)).

Transport

Se reporter entre autre à l'Accord européen relatif au transport international des marchandises dangereuses par route (dit " Accord ADR ") en vigueur (<https://unece.org/fr/about-adr>). Pour plus d'information, consulter les services du ministère chargé du transport.

Recommandations

Au point de vue technique

Information et formation des travailleurs

- **Instruire le personnel** des risques présentés par la substance, des précautions à observer, des mesures d'hygiène à mettre en place ainsi que des mesures d'urgence à prendre en cas d'accident.
- **Former les opérateurs** à la manipulation des moyens d'extinction (extincteurs, robinet d'incendie armé...).
- **Former les opérateurs** au risque lié aux atmosphères explosives (risque ATEX) [23].
- Observer une **hygiène corporelle et vestimentaire** très stricte : Lavage soigneux des mains (savon et eau) après manipulation et changement de vêtements de travail. Ces vêtements de travail sont fournis gratuitement, nettoyés et remplacés si besoin par l'entreprise. Ceux-ci sont rangés séparément des vêtements de ville. En aucun cas les salariés ne doivent quitter l'établissement avec leurs vêtements et leurs chaussures de travail.
- Ne pas **fumer, vapoter, boire** ou **manger** sur les lieux de travail.

Manipulation

- N'entreposer dans les ateliers que **des quantités réduites de substance** et ne dépassant pas celles nécessaires au travail d'une journée.
- **Éviter tout contact** de produit avec la **peau** et les **yeux**. **Éviter l'inhalation** de poussières, de fumées ou de brouillards. Effectuer en **système clos** toute opération industrielle qui s'y prête. Dans tous les cas, prévoir une aspiration des poussières, fumées ou brouillards à leur source d'émission (attention à la formation possible d'hydrogène au contact de l'eau) ainsi qu'une ventilation générale des lieux de travail conformément à la réglementation en vigueur [91, 92].
- **Réduire** le nombre de personnes exposées à l'aluminium (poudre) et ses composés.
- Evaluer **régulièrement** l'exposition des salariés l'aluminium (poudre) et ses composés présents dans l'air (§ Méthodes de détection et de détermination dans l'air).
- Les équipements et installations conducteurs d'électricité utilisant ou étant à proximité de l'aluminium (poudre) et ses composés doivent posséder des **liaisons équipotentielles** et être **mis à la terre**, afin d'évacuer toute accumulation de charges électrostatiques pouvant générer une source d'inflammation sous forme d'étincelles [93].
- Les opérations génératrices de sources d'inflammation (travaux par point chaud type soudage, découpage, meulage...) réalisées à proximité ou sur les équipements utilisant ou contenant l'aluminium (poudre) et ses composés doivent faire l'objet d'un **permis de feu** [94].
- Au besoin, les espaces dans lesquels la substance est stockée et/ou manipulée doivent faire l'objet d'une **signalisation** [95].
- Ne jamais procéder à des travaux sur ou dans des cuves et réservoirs contenant ou ayant contenu l'aluminium (poudre) et ses composés sans prendre les précautions d'usage [96].
- Supprimer toute source d'exposition par contamination en procédant à un **nettoyage régulier** des locaux et postes de travail.

Équipements de Protection Individuelle (EPI)

- Leur choix dépend des conditions de travail et de l'évaluation des risques professionnels.
- Les EPI ne doivent pas être source d' **électricité statique** (chaussures antistatiques, vêtements de protection et de travail dissipateurs de charges) [97, 98]. Une attention particulière sera apportée lors du **retrait des équipements** afin d'éviter toute contamination involontaire. Ces équipements seront éliminés en tant que déchets dangereux [99 à 102].
- Appareils de protection respiratoire : si un appareil filtrant peut être utilisé, il doit être muni d'un filtre anti-aérosols de type P2 ou P3 selon le composé. Pour des interventions d'urgence, le port d'un appareil respiratoire autonome isolant est nécessaire [103].
- Gants : Les matériaux préconisés pour les substances sous forme solide sont le caoutchouc nitrile, le caoutchouc butyle, le chlorure de polyvinyle et le polychloroprène [104, 105].
- Vêtements de protection : Quand leur utilisation est nécessaire (en complément du vêtement de travail), leur choix dépend de l'**état physique** de la substance. **Seul le fabricant** peut confirmer la protection effective d'un vêtement contre les dangers présentés par la substance. Dans le cas de vêtements réutilisables, il convient de **se conformer strictement à la notice du fabricant** [106].
- Lunettes de sécurité : La rubrique 8 « Contrôles de l'exposition / protection individuelle » de la FDS peut renseigner quant à la nature des protections oculaires pouvant être utilisées lors de la manipulation de la substance [107].

Stockage

- Stocker l'aluminium (poudre) et ses composés dans des locaux **frais** et **sous ventilation mécanique permanente**. Tenir à l'écart de la chaleur, des surfaces chaudes, de toute source d'inflammation (étincelles, flammes nues, rayons solaires...) et à l'écart des produits incompatibles tels que les agents oxydants, les agents réducteurs, les bases fortes et les acides. L'aluminium en poudre (pyrophorique) sera stocké et manipulé sous gaz inerte.
- **Fermer soigneusement** les récipients et les étiqueter conformément à la réglementation. Reproduire l'étiquetage en cas de fractionnement.
- Le sol des locaux sera **imperméable** et formera **une cuvette de rétention** afin qu'en cas de déversement, la substance ne puisse se répandre au dehors.
- Mettre le matériel **électrique** et **non-électrique**, y compris l' **éclairage** et la **ventilation**, en conformité avec la réglementation concernant les atmosphères explosives.
- Mettre à disposition dans ou à proximité immédiate du local/zone de stockage des moyens d'extinction adaptés à l'ensemble des produits stockés.
- **Séparer** l'aluminium (poudre) et ses composés des produits combustibles. Si possible, les stocker **à l'écart** des autres produits chimiques dangereux.
- **Séparer** le nitrate d'aluminium des produits combustibles ou inflammables. Si possible, le stocker **à l'écart** des autres produits chimiques dangereux.

Déchets

- Le stockage des déchets doit suivre les mêmes règles que le stockage des substances à leur arrivée (§ stockage).

- Ne pas rejeter à l'égout ou dans le milieu naturel les eaux polluées par l'aluminium (poudre) et ses composés.
- Conserver les déchets et les produits souillés dans des récipients spécialement prévus à cet effet, **clos et étanches**. Les éliminer dans les conditions autorisées par la réglementation en vigueur.

En cas d'urgence

- En cas de déversement accidentel d'aluminium ou d'un de ses composés solides, **le balayage et l'utilisation de la soufflette sont à proscrire**, n'utiliser qu'un **aspirateur adapté** à l'aspiration de poussières combustibles. Récupérer immédiatement les déchets - en évitant de générer des poussières - dans des récipients prévus à cet effet, propres et secs, résistants et étanches.
- En cas de déversement accidentel de liquide contenant des composés solubles d'aluminium, récupérer le produit après l'avoir recouvert de matériau absorbant inerte et non combustible (sable, vermiculite) [108]. Laver ensuite à grande eau la surface souillée.
- Des appareils de protection respiratoire isolants autonomes sont à prévoir **à proximité et à l'extérieur** des locaux pour les interventions d'urgence.
- Prévoir l'installation de **fontaines oculaires** et de **douches de sécurité**.
- Si ces mesures ne peuvent pas être réalisées sans risque de sur-accident ou si elles ne sont pas suffisantes, contacter les équipes de secours interne ou externe au site.

Au point de vue médical

- **Eviter d'exposer** à des postes comportant un risque d'exposition à l'aluminium les sujets atteints de pathologies respiratoires ou neurologiques chroniques.
- **Lors des examens initiale et périodiques :**
 - **Examen clinique :** la visite d'embauchage comportera un interrogatoire et un examen clinique soigneux qui pourra être complété par des épreuves fonctionnelles respiratoires qui serviront d'examen de référence.
 - **Examens complémentaires :** la fréquence des examens médicaux périodiques et la nécessité ou non d'effectuer des examens complémentaires seront déterminées par le médecin du travail en fonction de l'importance de l'exposition. On recherchera plus particulièrement des signes d'irritation des voies aériennes supérieures et broncho-pulmonaire, ainsi qu'une atteinte des fonctions cognitives. Les examens complémentaires d'embauchage pourront également être répétés à intervalles réguliers.
- **Surveillance biologique :** le dosage de l'aluminium urinaire en fin de poste et fin de semaine peut être proposé pour la surveillance biologique. Des valeurs biologiques d'interprétation (VBI) professionnelles et issues de la population générale adulte sont disponibles pour cet indicateur [36].
- **Autres :** déconseiller le port de lentilles de contact souples hydrophiles lors de travaux pouvant potentiellement exposer à des vapeurs ou aérosols de cette substance.

Conduite à tenir en cas d'urgence :

- **En cas de projection cutanée** de solutions de sels irritants, retirer immédiatement les vêtements souillés et laver la peau à grande eau pendant 15 minutes. Ne réutiliser les vêtements qu'après les avoir décontaminés. Si des lésions cutanées apparaissent ou si la contamination est étendue ou prolongée, consulter un médecin.
- **En cas de projection oculaire**, appeler immédiatement un SAMU. Rincer immédiatement et abondamment les yeux à l'eau courante pendant au moins 15 minutes, paupières bien écartées ; En cas de port de lentilles de contact, les retirer avant le rinçage. Dans tous les cas consulter un ophtalmologiste, et le cas échéant signaler le port de lentilles.
- **En cas d'inhalation de poussières, de fumées ou de brouillards**, appeler rapidement un centre antipoison. Transporter la victime en dehors de la zone polluée en prenant les précautions nécessaires pour les sauveteurs. Si la victime est inconsciente, la placer en position latérale de sécurité et mettre en œuvre, s'il y a lieu, des manœuvres de réanimation. Si la victime est consciente, la maintenir au maximum au repos. Si nécessaire, retirer les vêtements souillés (avec des gants adaptés) et commencer une décontamination cutanée et oculaire (laver la peau immédiatement et abondamment à grande eau pendant au moins 15 minutes). En cas de symptômes, consulter rapidement un médecin.
- **En cas d'ingestion**, appeler immédiatement un SAMU ou un centre antipoison, faire transférer la victime en milieu hospitalier dans les plus brefs délais. Si la victime est inconsciente, la placer en position latérale de sécurité et mettre en œuvre, s'il y a lieu, des manœuvres de réanimation. Si la victime est consciente, faire rincer la bouche avec de l'eau, ne pas faire boire, ne pas tenter de provoquer des vomissements.

Bibliographie

- 1 | Évaluation des risques sanitaires liés à l'exposition de la population française à l'aluminium. AFSSA - AFSSAPS - InVS, 2003.
- 2 | Aluminium, aluminium sulphate, aluminium chloride, aluminium fluoride, aluminium hydroxide, aluminium nitrate. Dossiers d'enregistrement REACH (<https://echa.europa.eu/fr/home>).
- 3 | Aluminium fluoride. European Union Risk assessment Report. European Chemicals Agency, Bureau REACH, The Netherlands, March 2008 (<https://echa.europa.eu/fr/home>).
- 4 | Aluminium. In : Seidel A (ed) - Kirk-Othmer Encyclopedia of chemical technology, 5th ed. Vol. 2. New York : J Wiley Interscience ; 2004 : 279-441.
- 5 | Aluminium in Patty's Toxicology, 5th ed. Vol 2. New York : John Wiley and Sons ; 2001 : 353-415.
- 6 | Aluminium, aluminium sulphate, aluminium chloride, aluminium fluoride, aluminium hydroxide, aluminium nitrate. The Merck index. An encyclopedia of chemicals, drugs and biological. 14th ed. Whitehouse Station : Merck and Co ; 2006.
- 7 | Aluminium et dérivés. Fiche toxicologique et environnementale. INERIS, 2005 (<https://substances.ineris.fr/fr/>).
- 8 | Toxicological profile for Aluminum. ATSDR, 2008 (<https://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp22.pdf>).
- 9 | Aluminium sulphate. UK PID Monograph 34. WHO, 1996.
- 10 | Aluminium, aluminium sulphate, aluminium chloride, aluminium fluoride, aluminium hydroxide, aluminium nitrate. In : HSBD. NLM, 2013 (<https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/>).
- 11 | Aluminium, aluminium powder (pyrophoric), aluminium powder (stabilised), aluminium sulphate, aluminium chloride (anhydrous), aluminium fluoride, aluminium hydroxide, aluminium nitrate. In : Gestis databank on hazardous substances. BGIA, 2013-2014 (<https://gestis-database.dguv.de/>).

- 12 | Aluminium métal, trisulfate d'aluminium anhydre, trichlorure d'aluminium, trifluorure d'aluminium, hydroxide d'aluminium, nitrate d'aluminium. In : Répertoire toxicologique. CSST, 1993-2014 ([https://reptox.cnesst.gouv.qc.ca/pages/fiche-complete.aspx?no_produit=1118215&nom=Hydroxyde+d%27aluminium+\(b%C3%AAta-\)\)](https://reptox.cnesst.gouv.qc.ca/pages/fiche-complete.aspx?no_produit=1118215&nom=Hydroxyde+d%27aluminium+(b%C3%AAta-)))).
- 13 | Chlorure d'aluminium, Nitrate d'aluminium, Sulfate d'aluminium. Rapport d'évaluation, liste des substances d'intérêt prioritaire, Loi canadienne sur la protection de l'environnement. Environnement Canada, Santé Canada, 2010.
- 14 | Aluminium powder, aluminium sulfate, aluminium chloride (anhydrous), aluminium fluoride (anhydrous), aluminium hydroxide. Fiches IPCS. ICSC 0988, 1191, 1125, 1324, 0373, 2000-2012 (www.inchem.org/pages/icsc.html).
- 15 | Pascal P - Nouveau traité de chimie minérale. Vol 6, Paris, Masson et Compagnie, 1961 : 477-668.
- 16 | Aluminium. EHC 194, 1997 (www.inchem.org/documents/ehc/ehc/ehc194.htm).
- 17 | Pohanish RP, Greene SA - Wiley guide to chemical incompatibilities. 3rd ed. Hoboken : John Wiley and sons ; 2009 : 1110 p.
- 18 | Bretherick's handbook of reactive chemicals hazards, 6th ed. Oxford, Butterworth-Heinemann Ltd, 1999, vol. 1, 2104 p.
- 19 | Réactions chimiques dangereuses. Brochure ED 697. INRS (<https://www.inrs.fr/>).
- 20 | Aluminium et composés. Aide mémoire technique « Les valeurs limites d'exposition professionnelle aux agents chimiques ». ED 984. INRS (<https://www.inrs.fr/>).
- 21 | Aluminium. In : Guide to Occupational Exposure Values. Cincinnati : ACGIH ; 2014.
- 22 | Les mélanges explosifs, poussières combustibles. Brochures ED 944. INRS (<https://www.inrs.fr/>).
- 23 | Mise en œuvre de la réglementation relative aux atmosphères explosives (ATEX). Guide méthodologique ED 945. INRS (<https://www.inrs.fr/>).
- 24 | Évaluation du risque incendie dans l'entreprise. Guide méthodologique ED 970. INRS (<https://www.inrs.fr/>).
- 25 | Les extincteurs d'incendie portatifs, mobiles et fixes. Brochure ED 6054. INRS (<https://www.inrs.fr/>).
- 26 | Statement on the potential risks from aluminium in the infant diet. Committee on toxicity of chemical in food, consumer products and the environment. 2013.
- 27 | Safety of aluminium from dietary intake. EFSA, 2008.
- 28 | Aluminum-containing food additives. WHO Food additives series : 65. FAO, 2012.
- 29 | Yokel RA et McNamara PJ - Influence of renal impairment, chemical form, and serum protein binding on intravenous and oral aluminum kinetics in the rabbit. *Toxicol Appl Pharmacol.* 1988 ; 95(1) : 32-43.
- 30 | Anane R, Bonini M, Grafeille MJ et al - Bioaccumulation of water soluble aluminum chloride in the hippocampus after transdermal uptake in mice. *Arch Toxicol.* 1995 ; 69(8) : 568-571.
- 31 | Greger JL et Sutherland JE - Aluminum exposure and metabolism. *Crit Rev Clin Lab Sci.* 1997 ; 34(5) : 439-474.
- 32 | Anane R, Bonini M et Creppy EE - Transplacental passage of aluminum from pregnant mice to fetus organs after maternal transcutaneous exposure. *Hum Exp Toxicol.* 1997 ; 16(9) : 501-504.
- 33 | Flarend R, Bin T, Elmore D et al - A preliminary study of the dermal absorption of aluminum from antiperspirants using aluminum-26. *Food Chem Toxicol.* 2001 ; 39(2) : 163-168.
- 34 | Perl DP et Good PF - Uptake of aluminum into central nervous system along nasal-olfactory pathways. *Lancet.* 1987 ; 1(8540) : 1028.
- 35 | Aluminium, CMR substitué = Chlorure de cadmium. In : Substitution-cmr, site consulté en août 2014 (<https://www.substitution-cmr.fr/>).
- 36 | Aluminium. In : BIOTOX. INRS, 2018 (<https://www.inrs.fr/>).
- 37 | Geyikoglu F, Türkmez H, Bakir TO et Cicek M - The genotoxic, hepatotoxic, nephrotoxic, haematotoxic and histopathological effects in rats after aluminium chronic intoxication. *Toxicol Ind Health.* 2012 ; 29(9) : 780-791.
- 38 | Garbossa G, Galvez G, Castro ME et al - Oral aluminium administration to rats with normal renal function. 1. Impairment of erythropoiesis. *Hum Exp Toxicol.* 1998 ; 17(6) : 312-317.
- 39 | Dixon RL, Sherins RJ et Lee IP - Assessment of environmental factors affecting male fertility. *Environ Health Perspect.* 1979 ; 30 : 53-68.
- 40 | Ondreicka R, Ginter E et Kortus J - Chronic toxicity of aluminum in rats and mice and its effects on phosphorus metabolism. *Br J Ind Med.* 1966 ; 23(4) : 305-312.
- 41 | Farina M, Rotta LN, Soares FA et al - Hematological changes in rats chronically exposed to oral aluminum. *Toxicol.* 2005 ; 209(1) : 29-37.
- 42 | Zhu YZ, Liu DW, Liu ZY et Li YF - Impact of aluminium exposure on the immune system : a mini review. *Environ Toxicol Pharmacol.* 2013 ; 35 : 82-87.
- 43 | Paz LN, Moura LM, Feio DCA, de Souza Gonçalves Cardoso M et al. - Evaluation of in vivo and in vitro toxicological and genotoxic potential of aluminum chloride. *Chemosphere.* 2017 ; 175 : 130-137.
- 44 | Sethi P, Jyoti A, Singh R et al - Aluminium-induced electrophysiological, biochemical and cognitive modifications in the hippocampus of aging rats. *Neurotox.* 2008 ; 29 : 1069-1079.
- 45 | Kumar A, Dogra S et Prakash A - Protective effect of curcumin (Curcuma longa) against aluminium toxicity : possible behavioral and biochemical alterations in rats. *Behav Brain Res.* 2009 ; 205 : 384-390.
- 46 | Prakash A et Kumar A - Effect of N-Acetyl cysteine against aluminium- induced cognitive dysfunction and oxidative damage in rats. *Basic Clin Pharmacol Toxicol.* 2009 ; 105 : 98-104.
- 47 | Mameli O, Carin MA, Melis P et al - Effect of aluminium consumption on the vestibulo-ocular reflex. *Metab Brain Dis.* 2006 ; 21 : 89-107.
- 48 | Erazi H, Sansar W, Ahboucha S et Gamrani H - Aluminium affects glial system and behavior of rats. *CR Biol.* 2010 ; 333 : 23-27.
- 49 | Sharma P et Mishra KP - Aluminum-induced maternal and developmental toxicity and oxidative stress in rat brain : response to combined administration of Tiron and glutathione. *Reprod Toxicol.* 2006 ; 21 : 313-321.

- 50 | Zhu YZ, Sun H, Fu Y et al - Effects of sub-chronic aluminum chloride on spermatogenesis and testicular enzymatic activity in male rats. *Life Sci.* 2014 ; 102 : 36-40.
- 51 | Mouro VGS, Menezes TP, Lima GDA, Domingues RR et al. - How bad is aluminum exposure to reproductive parameters in rats ? *Biol Trace Elem Res.* 2018 ; 183 : 314-324.
- 52 | Martinez CS, Escobar AG, Uranga-Ocio JA, Peçanha FM et al. - Aluminum exposure for 60 days at human dietary levels impairs spermatogenesis and sperm quality in rats. *Repr Toxicol.* 2017 ; 73 : 128-141.
- 53 | Fu Y, Jia FB, Wang J et al - Effects of sub-chronic aluminium chloride exposure on rat ovaries. *Life Sci.* 2014 ; 100 : 61-66.
- 54 | Domingo JL, Gomez M, Bosque MA et al - Lack of teratogenicity of aluminum hydroxide in mice. *Life Sci.* 1989 ; 45(3) : 243-247.
- 55 | Bataineh HN, Bataineh ZM et Daradka H - Short-term exposure of female rats to industrial metal salts : effect on implantation and pregnancy. *Reprod Med Biol.* 2007 ; 6(3) : 179-183.
- 56 | Inohara M, Eguchi A, Nakamura M, Nagahara R et al. - Developmental exposure to aluminum chloride irreversibly affects postnatal hippocampal neurogenesis involving multiple functions in mice. *Toxicol Sci.* 2018 ; 164(1) : 264-277.
- 57 | Hirata-Koizumi M, Fujii S, Ono A et al - Two-generation reproductive toxicity study of aluminium sulfate in rats. *Reprod Toxicol.* 2011 ; 31(2) : 219-230.
- 58 | Roig JL, Fuentes S, Colomina MT et al - Aluminum, restraint stress and aging : behavioral effects in rats after 1 and 2 years of aluminum exposure. *Toxicol.* 2006 ; 218 : 112-124.
- 59 | Ali MA, Simin EV et Rahim C - Effect of oral aluminum chloride administration during lactation on short and long term memory of their offspring. *J Biol Sci.* 2008 ; 8(4) : 767-772.
- 60 | Shaw CA, Li Y et Tomljenovic - Administration of aluminium to neonatal mice in vaccine-relevant amounts is associated with adverse long term neurological outcomes. *J Inorg Biochem.* 2013 ; 128 : 237-244.
- 61 | Gourier-Fréry C, Fréry N, Berr C, Cordier S et al - Aluminium. Quels risques pour la santé ? Synthèse des études épidémiologiques. Volet épidémiologique de l'expertise collective InVS-Afssa-Afssaps. Saint-Maurice : Institut de veille sanitaire. 2004 : 184 p.
- 62 | Gourier-Fréry C, Fréry N - Aluminium. Encyclopédie médico-chirurgicale. Pathologie professionnelle et de l'environnement 16-002-A-10. Issy-les-Moulineaux : Elsevier Masson ; 2009 : 10 p.
- 63 | Hull MJ, Abraham JL - Aluminium welding fume-induced pneumoconiosis. *Hum Pathol.* 2002 ; 33(8) : 819-825.
- 64 | Cai H, Cao M, Meng F, Wei J - Pulmonary sarcoid-like granulomatosis induced by aluminium dust : report of a case and literature review. *Chin Med J.* 2007 ; 120(17) : 1556-1560.
- 65 | Burge PS, Scott JA, McCoach J - Occupational asthma caused by aluminium. *Allergy.* 2000 ; 55 : 779-780.
- 66 | Vandenplas O, Delwiche JP, Vanbilsen ML, Joly J et al - Occupational asthma caused by aluminium welding. *Eur Respir J.* 1998 ; 11 : 1182-1184.
- 67 | Riihimäki V, Hanninen H, Akila R, Kovala et al - Body burden of aluminium in relation to central nervous system function among metal inert-gas welders. *Scand J Work Environ Health.* 2000 ; 26(2) : 118-130.
- 68 | Bishop NJ, Morley R, Day JP, Lucas A - Aluminium neurotoxicity in preterm infants receiving intravenous-feeding solutions. *N Engl J Med.* 1997 ; 336(22) : 1557-1561.
- 69 | Fewtrell MS, Edmonds CJ, Isaacs E, Bishop NJ et al - Aluminium exposure from parenteral nutrition in preterm infants and later health outcomes during childhood and adolescence. *Proc Nutr Soc.* 2011 ; 70 : 299-304.
- 70 | Willhite CC, Karyakina AN, Yokel RA, Yenugaghati N et al - Systematic review of potential health risks posed by pharmaceutical, occupational and consumer exposures to metallic and nanoscale aluminium, aluminium oxides, aluminium hydroxide and its soluble salts. *Crit Rev Toxicol.* 2014 ; 44(54) : 1-80.
- 71 | Peters T, Hani N, Kirchberg K, Gold H et al - Occupational contact sensitivity to aluminium in a machine construction plant worker. *Contact Dermatitis.* 1998 ; 39(6) : 322-323.
- 72 | Tosti A, Vincenzi C, Peluso AM - Accidental diagnosis of aluminium sensitivity with Finn Chambers. *Contact Dermatitis.* 1990 ; 23(1) : 48-49.
- 73 | Garg S, Loghdey S, Gawkrödger DJ - Allergic contact dermatitis from aluminium in deodorants. *Contact Dermatitis.* 2010 ; 62(1) : 57-58.
- 74 | Bergfors E, Trollfors B - Sixty-four children with persistent itching nodules and contact allergy to aluminium after vaccination with aluminium - absorbed vaccines - prognosis and outcome after booster vaccination. *Eur J Pediatr.* 2012 ; 172 : 171-177.
- 75 | Netterlid E, Nindsén M, Siemund I, Bjork J et al - Does allergen-specific immunotherapy induce contact allergy to aluminium ? *Acta Derm Venereol.* 2013 ; 93 : 50-56.
- 76 | Occupational exposures during aluminium production. In : Chemical agents and related occupations. IARC Monographs on the Evaluation of the Carcinogenic Risks to Humans. Vol. 100F IARC ; 2012 (<https://monographs.iarc.who.int/monographs-available/>).
- 77 | Métaux et métalloïdes M-120. In : MétroPol. INRS, 2015 (<https://www.inrs.fr/>).
- 78 | Métaux et métalloïdes M-121. In : MétroPol. INRS, 2015 (<https://www.inrs.fr/>).
- 79 | Métaux et métalloïdes M-122. In : MétroPol. INRS, 2015 (<https://www.inrs.fr/>).
- 80 | Métaux et métalloïdes M-124. In : MétroPol. INRS, 2015 (<https://www.inrs.fr/>).
- 81 | Métaux et métalloïdes M-125. In : MétroPol. INRS, 2016 (<https://www.inrs.fr/>).
- 82 | Air des lieux de travail. Détermination des métaux et métalloïdes dans les particules en suspension dans l'air par spectrométrie d'émission atomique avec plasma à couplage inductif - Partie 1 : Prélèvement d'échantillons. Norme NF X43-265-1, NF ISO 15202-1. La Plaine Saint Denis : AFNOR ; 2020.
- 83 | Air des lieux de travail. Détermination des métaux et métalloïdes dans les particules en suspension dans l'air par spectrométrie d'émission atomique avec plasma à couplage inductif - Partie 2 : Préparation des échantillons. Norme NF X43-265-2, NF ISO 15202-2. La Plaine Saint Denis : AFNOR ; 2020.
- 84 | Air des lieux de travail. Détermination des métaux et métalloïdes dans les particules en suspension dans l'air par spectrométrie d'émission atomique avec plasma à couplage inductif - Partie 3 : Analyse spectrométrie d'émission atomique avec plasma à couplage Inductif. Norme NF X43-265-3, NF ISO 15202-3. La Plaine Saint Denis : AFNOR ; 2005.

- 85** | Qualité de l'air. Air des lieux de travail. Dosage d'éléments présents dans l'air des lieux de travail par spectrométrie atomique. Norme NF X43-275. La Plaine Saint Denis : AFNOR : 2002.
- 86** | Metal & metalloid particulates in workplace atmospheres (atomic absorption). Method ID-121. In : Sampling and Analytical Methods. OSHA, 2002 (<https://www.cdc.gov/niosh/nmam/>)
- 87** | Elements by ICP (Microwave Digestion). Method 7302. In : NIOSH Manual of Analytical Methods (NMAM), 5th edition. NIOSH, 2014 (<https://www.cdc.gov/niosh/nmam/>)
- 88** | Elements by ICP Microwave Digestion. Method 7304. In : NIOSH Manual of Analytical Methods (NMAM), 5th edition. NIOSH, 2014 (<https://www.cdc.gov/niosh/nmam/>)
- 89** | Elements by Cellulosic Internal Capsule Sampler. Method 7306. In : NIOSH Manual of Analytical Methods (NMAM), 5th edition. NIOSH, 2015 (<https://www.cdc.gov/niosh/nmam/>)
- 90** | Air des lieux de travail - Détermination des métaux et métalloïdes dans les particules en suspension dans l'air par spectrométrie de masse avec plasma à couplage inductif. Norme NF ISO 30011. La Plaine Saint Denis : AFNOR : 2010.
- 91** | Principes généraux de ventilation. Guide pratique de ventilation ED 695. INRS (<https://www.inrs.fr/>).
- 92** | Incendies et explosions lors du travail mécanique de l'aluminium. ED 6123. INRS (<https://www.inrs.fr/>).
- 93** | Phénomènes électrostatiques. Brochure ED 6354. INRS (<https://www.inrs.fr/>).
- 94** | Le permis de feu. Brochure ED 6030. INRS (<https://www.inrs.fr/>).
- 95** | Signalisation de santé et de sécurité au travail - Réglementation. Brochure ED 6293. INRS (<https://www.inrs.fr/>).
- 96** | Cuves et réservoirs. Interventions à l'extérieur ou à l'intérieur des équipements fixes utilisés pour contenir ou véhiculer des produits gazeux, liquides ou solides. Recommandation CNAM R 435. Assurance Maladie, 2008 (https://www.ameli.fr/val-de-marne/entreprise/tableau_recommandations)
- 97** | Vêtements de travail et équipements de protection individuelle - Propriétés antistatiques et critère d'acceptabilité en zone ATEX. Note documentaire ND 2358. INRS (<https://www.inrs.fr/>).
- 98** | EPI et vêtements de travail : mieux comprendre leurs caractéristiques antistatiques pour prévenir les risques d'explosion. Notes techniques NT33. INRS (<https://www.inrs.fr/>).
- 99** | Risques chimiques ou biologiques. Retirer sa tenue de protection en toute sécurité. Cas n°1 : Décontamination sous la douche. Dépliant ED 6165. INRS (<https://www.inrs.fr/>).
- 100** | Risques chimiques ou biologiques. Retirer sa tenue de protection en toute sécurité. Cas n°3 : Sans décontamination de la tenue. Dépliant ED 6167. INRS (<https://www.inrs.fr/>).
- 101** | Risques chimiques ou biologiques. Retirer ses gants en toute sécurité. Gants à usage unique. Dépliant ED 6168. INRS (<https://www.inrs.fr/>).
- 102** | Risques chimiques ou biologiques. Retirer ses gants en toute sécurité. Gants réutilisables. Dépliant ED 6169. INRS (<https://www.inrs.fr/>).
- 103** | Les appareils de protection respiratoire - Choix et utilisation. Brochure ED 6106. INRS (<https://www.inrs.fr/>).
- 104** | Des gants contre le risque chimique. Fiche pratique de sécurité ED 112. INRS (<https://www.inrs.fr/>).
- 105** | Forsberg K, Den Borre AV, Henry III N, Zeigler JP - Quick selection guide to chemical protective clothing. 6th ed. Hoboken : John Wiley & Sons ; 260 p.
- 106** | Quels vêtements de protection contre les risques chimiques. Fiche pratique de sécurité ED 127. INRS (<https://www.inrs.fr/>).
- 107** | Les équipements de protection individuelle des yeux et du visage - Choix et utilisation. Brochure ED 798. INRS (<https://www.inrs.fr/>).
- 108** | Les absorbants industriels. Aide-mémoire technique ED 6032. INRS (<http://www.inrs.fr>).

Historique des révisions

1 ^{re} Edition	2014
2 ^e édition (mise à jour partielle) : <ul style="list-style-type: none"> ■ Valeurs limites d'exposition professionnelle ■ Méthodes de détection et de détermination dans l'air ■ Toxicocinétique : <ul style="list-style-type: none"> ○ Surveillance biologique de l'exposition ■ Toxicité expérimentale : <ul style="list-style-type: none"> ○ Effets génotoxiques ○ Fertilité ○ Développement ■ Réglementation ■ Recommandations techniques et médicales ■ Bibliographie 	Avril 2021